LE SCIENZE
edizione italiana di SCIENTIFIC AMERICAN

numero 12
agosto 1969
anno II
volume II

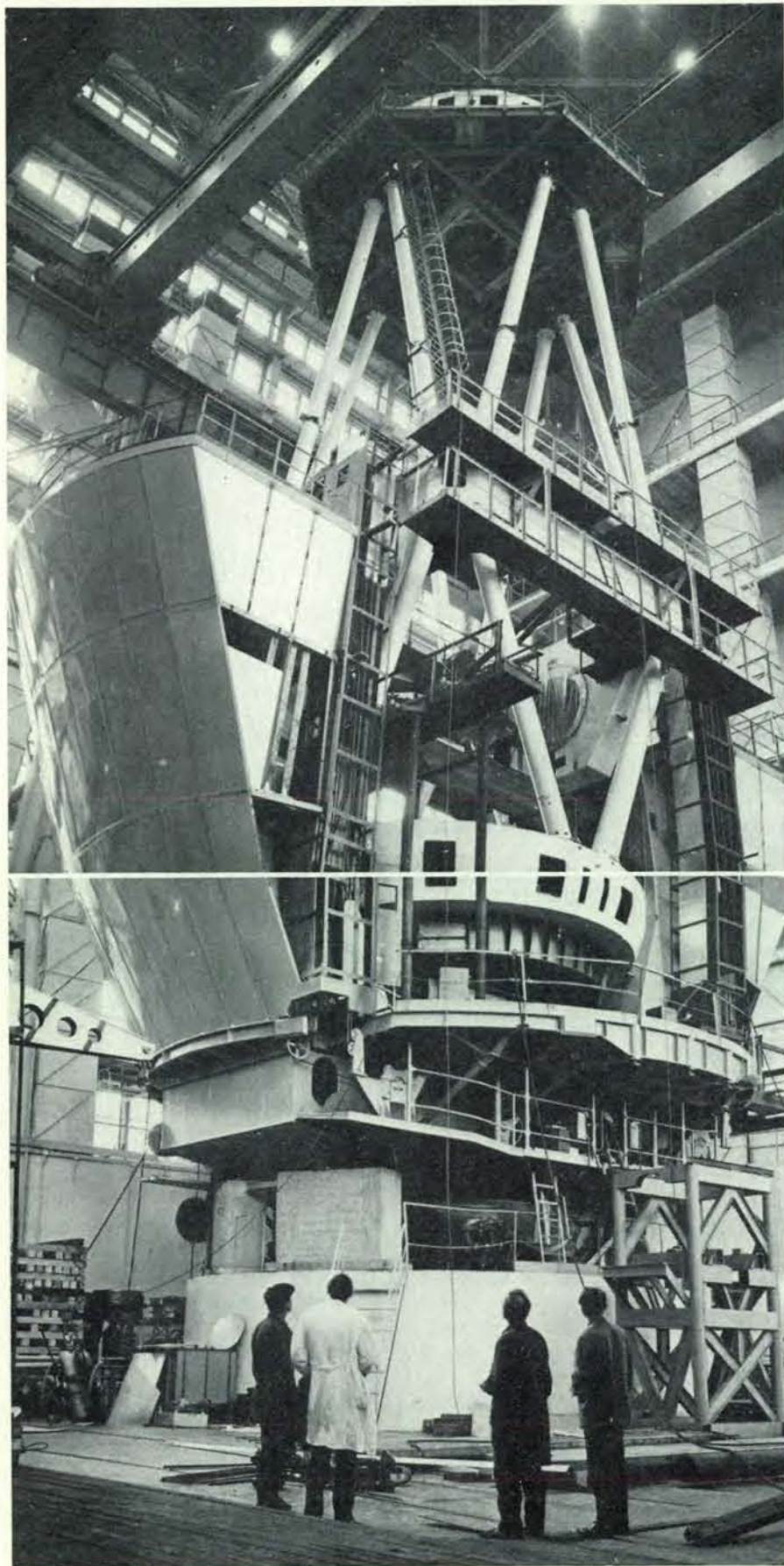
La politica della scienza nell'Unione Sovietica

Un recente studio ha mostrato che l'URSS dispone di un apparato di «Ricerca e Sviluppo» paragonabile per dimensioni a quello degli Stati Uniti. Le differenze fra i due paesi si stanno sempre piú riducendo

di R. W. Davies e R. Amann

La competizione fra Stati Uniti e Unione Sovietica nella tecnologia spaziale e nei tipi di armamento piú avanzato è soltanto uno degli aspetti di un piú ampio impegno che sta al centro dell'attenzione in tutti i paesi industriali, l'impegno cioè nella « Ricerca e Sviluppo » (*Research and Development*). In questa espressione, per « ricerca » si intende la ricerca di nuove conoscenze, per « sviluppo » l'intero processo che permette di trasformare le nuove conoscenze in nuovi procedimenti e nuovi prodotti. Ricerca e Sviluppo, che per brevità indicheremo con le iniziali R & S (corrispondenti all'inglese *R and D*), svolgono un ruolo chiave nell'espansione industriale, nella sanità pubblica e nella potenza militare. Ci si sta comunque rendendo conto che l'impegno finanziario di un paese in R & S è soltanto uno dei fattori che permettono di perseguire con successo il raggiungimento di conoscenze scientifiche e di tecnologie efficienti. Molto sembra infatti dipendere da una buona organizzazione e dal saper predisporre incentivi adeguati non soltanto per le scoperte e le invenzioni, ma anche per l'innovazione, consistente nel trasformare il risultato di una ricerca, che ha dimostrato una pratica applicabilità, nella sua effettiva applicazione su scala commerciale. A questo proposito, quindi, molte sono state le discussioni su come la R & S è organizzata e applicata nei due paesi dove essa ha raggiunto oggi lo stadio piú avanzato.

Da quando l'Unione Sovietica lanciò il suo primo satellite si è ritenuto, da molte parti, che la pianificazione centralizzata dagli sforzi scientifici e tecnici desse all'URSS un vantaggio sui paesi occidentali. Ciò non deve intendersi nel senso che l'URSS al momento attuale sia piú avanti dei paesi occidentali nella scienza e nella tecnologia, ma nel senso che a molti osservatori è sembrato che essa si stia muovendo piú rapidamente e anche con maggior prontezza nel rispondere alle esigenze nazionali e sociali. Un piú attento esame dell'impegno sovietico in R & S mostra chiaramente che questa è una semplificazione eccessiva. Anche nell'URSS, come altrove, si discute molto delle politiche attuali che sono perseguite nei confronti della scienza e della tecnologia. Un ampio studio sulla politica sovietica della scienza, recentemente completato da un gruppo di vari paesi del quale hanno fatto parte gli autori di questo articolo, mostra come l'URSS stia intraprendendo una riorganizzazione dei suoi sforzi nella R & S e stia cercando nuove forme di incentivazione. Lo studio è stato compiuto per conto dell'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE) da un gruppo composto da Eugène Zaleski del Centro nazionale per la ricerca scientifica francese, Joseph P. Kozlowski della U.S. National Science Foundation, Helgard Wienert della segreteria dell'OCSE e dagli autori, assistiti da M. J. Berry del Centro studi per l'URSS e per l'Europa Orientale presso la Birmingham University. La OCSE aveva precedentemente compiuto studi analoghi sulla politica della scienza nell'Europa occidentale e nell'America settentrionale. C'è da augurarsi che studi comparativi delle varie esperienze e strategie relative alla politica della scienza possano risultare utili per tutti i paesi presi in esame.

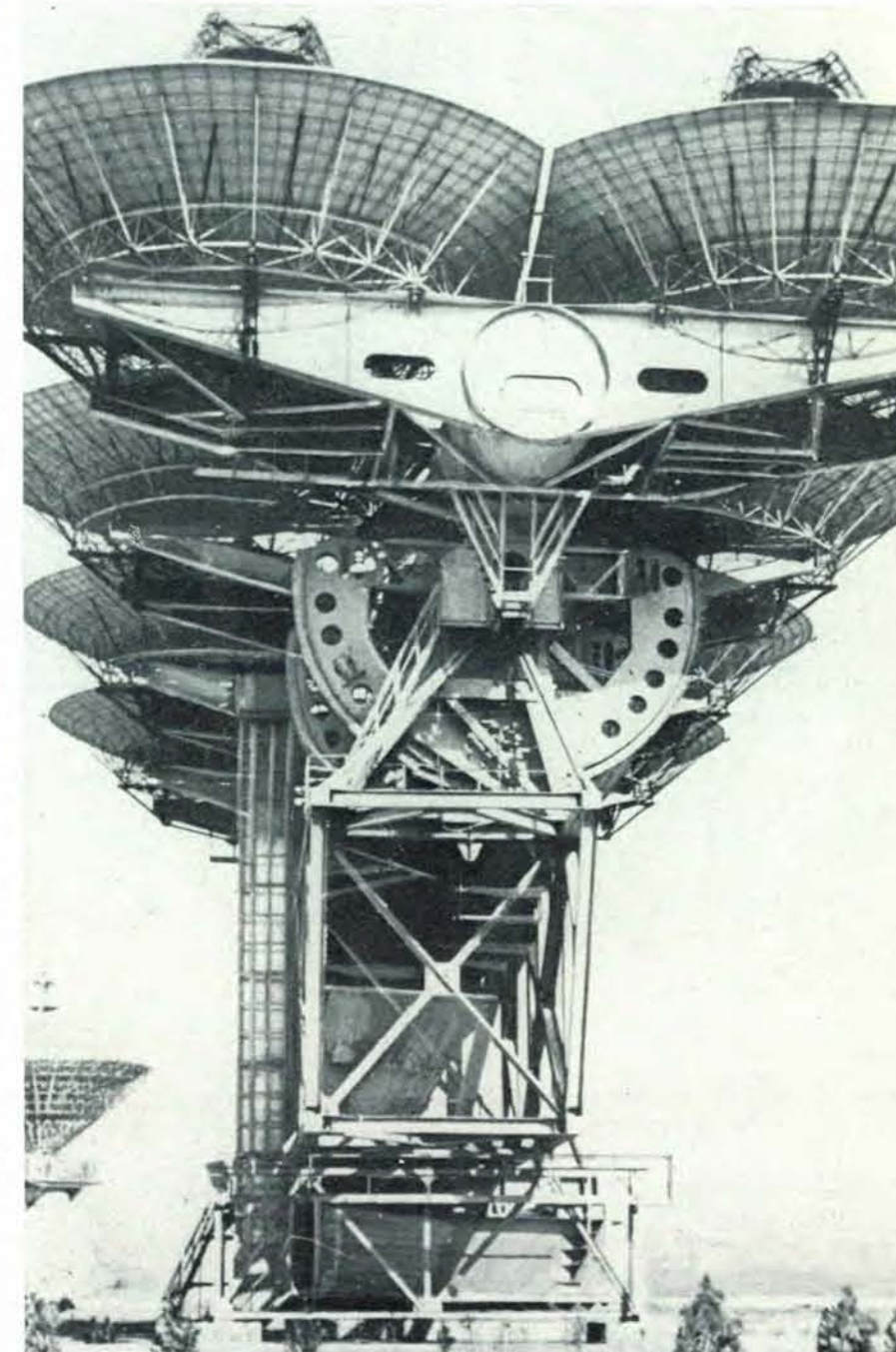
Il punto di partenza del nostro lavoro sulla scienza sovietica è stato il tentativo di stimare l'ampiezza dello sforzo in R & S dell'URSS in relazione a quello statunitense. Il confronto non può essere esatto, perché i due paesi danno definizioni diverse a « Ricerca e Sviluppo ». Si può comunque effettuare una stima grezza della manodopera impegnata in questa attività. Considerando soltanto quel personale che ha completato l'istruzione superiore, il nostro gruppo di Birmingham ha calcolato che il personale occupato in URSS in attività di R & S (per il 1965) è stato all'incirca compreso fra le 454 000 e le 631 000 unità, in confronto alle 497 000 unità impiegate

Il piú grande telescopio sovietico, una volta completato, sarà anche il piú grande telescopio del mondo. Avrà una lente di 6 metri di diametro, circa un metro in piú del riflettore di Monte Palomar. Il nuovo strumento sarà installato nel Caucaso, a Zelenchukskaya, a circa 2000 metri di altezza. La fotografia, composta di due fotogrammi separati, mostra il telescopio durante la fase di montaggio nelle officine di Leningrado.

negli Stati Uniti (per l'anno finanziario 1963-1964). Questi dati non includono coloro che effettuano ricerche nelle scienze sociali e in quelle umanistiche. Kozlowski ritiene invece che gli stessi dati siano piú alti di quelli da noi calcolati; egli calcola che nel 1965 gli ingegneri occupati in R & S erano circa 588 000 (escludendo i ricercatori nelle scienze naturali, gli economisti e cosí via). Grosso modo si può, comunque, ragionevolmente concludere che, in termini di manodopera, l'Unione Sovietica stia dedicando alla R & S lo stesso impegno degli Stati Uniti.

Questo necessariamente non significa che il livello dell'*output* scientifico e tecnico sovietico sia paragonabile a quello degli Stati Uniti. Molte cose, infatti, indicano che la produttività della R & S per uomo, nell'URSS, è chiaramente piú bassa, con la possibile eccezione della ricerca militare e spaziale. Questa minor produttività è un riflesso soprattutto del grado in cui l'URSS è in ritardo, rispetto agli Stati Uniti, nello sviluppo economico, nell'istruzione e nella tecnologia. Il totale del reddito nazionale dell'URSS, che ha una popolazione piú numerosa, non supera il 60 % di quello degli Stati Uniti; piú del 30 % della popolazione sovietica è occupata nell'agricoltura, in confronto al solo 5 % degli Stati Uniti. Il numero medio di anni di scolarità della popolazione sovietica adulta (da 16 anni in su) è soltanto di 6,6, mentre negli Stati Uniti esso è di 11,9. Nel settore della Ricerca e Sviluppo, e in genere in tutta l'economia sovietica, vi è una certa scarsezza rispetto all'abbondanza di attrezzature e di agevolazioni per la ricerca che si riscontra, invece, nella piú avanzata economia americana.

Proprio a causa del fatto che l'economia dell'URSS è meno avanzata di quella americana, la rivalità sovietica nei confronti degli Stati Uniti nel campo degli armamenti avanzati e dei programmi spaziali ha causato ai sovietici numerose difficoltà. La pressione sulle risorse materiali e sul personale qualificato è considerevole, se si tiene conto, in particolare, che l'URSS sta attualmente destinando una quota crescente delle proprie risorse alla produzione di beni di consumo e allo sviluppo delle industrie meno avanzate. Non può, quindi, destare meraviglia che l'URSS, come gli Stati Uniti, abbia rallentato i suoi sforzi soprattutto negli ultimi anni. Dal 1957 al 1962 il totale della manodopera impiegata in URSS in attività di R & S è piú che raddoppiato; dal 1962 al 1956 essa, invece, è aumentata solo del 28 % (*si veda la tabella in basso a pag. 16 e la figura in alto a pag. 17*). Per quanto riguarda l'incremento delle spese per R & S, esso è diminuito dal 15-20 % degli ultimi anni del decennio 1950-1960 al 10 % circa degli anni piú recenti (*si veda la figura in basso a pag. 17*).

Uno dei principali problemi che attualmente i responsabili della politica scientifica sovietica si trovano di fronte è quello di stabilire quanta parte delle risorse nazionali debba essere destinata alla R & S. I funzionari del Comitato di stato per la scienza e la tecnologia si battono per un forte aumento della spesa. Vadim A. Trapeznikov, primo vicepresidente del Comitato e figura di primo piano nel campo dell'automazione, ha recentemente proposto un programma intensivo, che prevede un incremento della spesa per R & S, per il quinquennio 1971-75, di un valore che si aggira attorno al 20-25 % annuo. Egli ha fornito dei calcoli secondo i quali ogni rublo speso in R & S produrrebbe un incremento di 1,49 per rublo in termini di reddito nazionale, a fronte di appena 0,39 per rublo investito nell'insieme dell'economia. Dall'altro lato, alcuni funzionari della Commissione di stato per la pianificazione (GOSPLAN) hanno assunto una posizione antitetica. Essi sono contrari a un maggior incremento di spesa per R & S, sostenendo che la redditività della ricerca è notevolmente piú bassa dei valori indicati da Trapeznikov. Essi ritengono infatti che la redditività per rublo speso in R & S sia scesa al di sotto dello 0,74 per rublo, cioè quanto ci si aspettava che fosse nel 1966. Sembra, quindi, che nell'ambito degli stessi ambienti governativi sovietici sia in corso una controversia sulla quantità della spesa per R & S a livello nazionale.

Un secondo problema che attualmente preoccupa i responsabili della politica scientifica sovietica è quello che riguarda la ripartizione delle spese di ricerca fra ricerca fondamentale e sviluppo. Non siamo riusciti a stabilire dati precisi sulla ripartizione all'interno delle spese per R & S, e cioè quanto vada alla ricerca di base, quanto alla ricerca applicata e quanto allo sviluppo. Secondo stime sovietiche, circa il 10-12 % del bilancio di R & S va alla ricerca fondamentale (la proporzione è pressoché la stessa degli Stati Uniti) e poco meno del 50 % va allo sviluppo (rispetto al 66 % degli Stati Uniti). Se questi dati sono esatti, circa il 40 % del bilancio di R & S nell'URSS è destinato alla ricerca applicata (rispetto al 22 % degli Stati Uniti). Sembra esserci qui uno strano paradosso: l'Unione Sovietica, che ha sempre posto l'accento sulle finalità pratiche della scienza, in realtà spende assai meno dei suoi fondi di R & S per trasferire le scoperte allo sviluppo di nuovi procedimenti e nuovi prodotti di quanto ne spendano gli Stati Uniti. Un esempio lampante di questo minore investimento nella ricerca di sviluppo può essere osservato nel campo della fisica nucleare. L'URSS ha effettuato massicci investimenti nelle macchine per gli studi di base nel campo della fisica delle alte energie; ha già costruito il piú grande acceleratore di particelle del mondo – un protosincrotone da 76 miliardi di elettronvolt (GeV) e sta valutando ora se costruire un acceleratore da 1000 GeV (già progettato) o se passare direttamente a un acceleratore da 2000 o addirittura da 10 000 GeV, forse in collaborazione con altri paesi. Eppure l'URSS nel passato recente non è stata in grado di mettere a disposizione fondi per la costruzione di impianti pilota per lo sviluppo dell'energia nucleare, secondo quanto è stato affermato con rammarico dal pre-

Questo imponente insieme di antenne di una base spaziale sovietica è usato per seguire i veicoli spaziali inviati in missioni interplanetarie. Esso ha mantenuto il contatto con le sonde Venus 5 e Venus 6 fino a che queste sono state in grado di ricevere e trasmettere.

sidente del Comitato responsabile della costruzione di centrali atomiche.

Si è molto discusso pubblicamente fra scienziati e funzionari sovietici sulla necessità di correggere questi squilibri fra ricerca scientifica e sviluppo tecnologico. Tutti sono d'accordo sulla necessità di dedicare maggiore attenzione allo sviluppo; la discussione verte sull'alternativa di reperire i necessari fondi richiesti all'interno del bilancio per la ricerca, oppure se debbano essere attinti dal bilancio dello stato per gli investimenti in generale. Famosi scienziati hanno respinto ogni tentativo di sottrarre fondi già destinati alla ricerca fondamentale. All'assemblea generale dell'Accademia delle scienze sovietiche dello scorso anno, il presidente respinse la proposta che l'Accademia partecipasse ad alcuni progetti di ricerca applicata, con la motivazione che « questo avrebbe dirottato risorse destinate alla ricerca fondamentale ».

Il conflitto fra ricerca fondamentale e ricerca applicata sta mettendo in luce importanti problemi relativi al sistema di organizzazione delle attività di R & S nell'URSS. Sotto certi aspetti questo sistema differisce nettamente dalle soluzioni adottate sia negli Stati Uniti sia nel Regno Unito. Mentre nei paesi occidentali la ricerca di base è effettuata principalmente nelle università, nell'URSS gran parte di essa è realizzata da accademie che non hanno come fine principale quello dell'istruzione. Una seconda importante differenza è che la ricerca applicata e lo sviluppo nell'URSS sono effettuati soprattutto presso istituzioni direttamente controllate dai dipartimenti governativi responsabili di particolari settori industriali, contrariamente a quanto avviene negli Stati Uniti, dove le industrie perseguono direttamente la maggior parte delle attività di R & S, anche quelle finanziate dal governo.

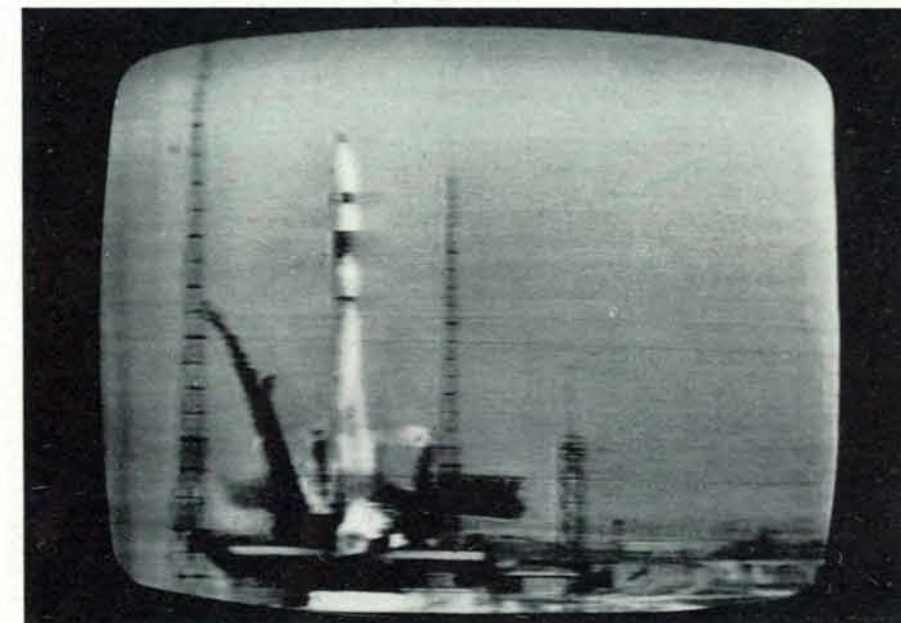
L'organizzazione della scienza sovietica, che fa capo agli organi centrali del Partito Comunista, è articolata in tre gruppi di organismi che amministrano tutte le attività scientifiche sovietiche: l'Accademia delle scienze, i ministeri industriali e governativi e il ministero per l'istruzione superiore e secondaria. Quest'ultimo organismo si occupa principalmente dell'istruzione; gli altri due gruppi di organismi fanno la parte del leone nella R & S. Il « sistema delle accademie » occupa il 20 % del totale del personale di R & S e il « sistema dei ministeri » il restante 80 %. Il Comitato di stato per la scienza e la tecnologia è responsabile del coordinamento della R & S. Esso recentemente ha richiesto con insistenza un bilancio della ricerca maggiore di quello che la Commissione di stato per la pianificazione (GOSPLAN) ritiene giusto che sia destinato alla R & S.

Per rendersi conto dei problemi che l'URSS deve affrontare è necessario esaminare in dettaglio l'organizzazione della ricerca sovietica. Al centro del sistema, ma non con funzioni di controllo, vi è l'Accademia delle scienze (*si veda l'illustrazione a fronte*). Nella Russia zarista l'Accademia imperiale delle scienze era essenzialmente un club di scienziati illustri come la Royal Society di Londra. La rivoluzione bolscevica e i successivi piani quinquennali hanno trasformato l'Accademia in un centro nazionale per la ricerca fondamentale, al quale fanno capo circa 100 istituti scientifici dislocati in tutto il territorio sovietico, da Leningrado fino alla Siberia orientale. Oltre alla Accademia delle scienze, esistono accademie di ricerca speciali per la medicina, l'agricoltura e l'istruzione, e ciascuna delle principali repubbliche sovietiche ha una sua propria Accademia delle scienze. Queste accademie nel loro insieme occupavano nel 1965 ben 74 000 scienziati, tutti impegnati nella ricerca anziché nell'insegnamento (*si veda la figura a pag. 16*).

I vari ministeri del governo centrale hanno alle loro dipendenze un'altra rete di istituti di ricerca, il cosiddetto sistema settoriale, cioè una rete di istituti di ricerca e sviluppo che operano per i vari settori industriali e governativi. In questi istituti sono occupati più di 316 000 scienziati, circa i 4/5 degli scienziati sovietici che lavorano nella R & S.

Caratteristico della differenza fra l'organizzazione della ricerca negli Stati Uniti e nell'Unione Sovietica è il fatto che, mentre il primo reattore nucleare negli Stati Uniti è stato costruito in un *campus* universitario (lo Stagg Field dell'Università di Chicago), il primo reattore in URSS è stato costruito in un laboratorio dell'Accademia delle scienze. In URSS i ricercatori più geniali in campo scientifico e umanistico sono attratti dalle accademie, più che dagli istituti di insegnamento superiore (VUZy) che si dedicano soprattutto all'istruzione. I VUZy effettuano alcune ricerche e negli ultimi anni il ministero da cui dipendono ha aumentato i loro bilanci, cosicché essi ora hanno più di 700 istituti e laboratori di ricerca alle loro dipendenze. Il personale insegnante tuttavia ha un orario di insegnamento così pesante (generalmente 18 ore settimanali per 40 settimane l'anno) che i professori hanno a loro disposizione pochissimo tempo per una seria attività di ricerca. In un recente incontro fra il ministro dell'Istruzione superiore e il Praesidium dell'Accademia delle scienze, il presidente dell'Accademia ha tentato di scoraggiare le proposte che appoggiavano lo spostamento di fondi per la ricerca a favore dei VUZy. Egli ha invece parlato favorevolmente dell'organizzazione delle università di Oxford e Cambridge, dove « c'è una categoria di "tutors" che si limitano a insegnare e null'altro è a loro richiesto ».

Anche il sistema settoriale per la R & S industriale è in discussione e è sottoposto a un accurato riesame. Si tratta di dare un maggior peso nella R & S alle imprese industriali. Alcune di esse, principalmente nel campo delle attrezzature elettriche pesanti e in quello delle macchine utensili, hanno già sviluppato questa funzione a un buon livello, con laboratori di ricerca bene equipaggiati e uffici di progettazione annessi alle loro fabbriche. In generale, tuttavia, la maggior parte della ricerca industriale nell'URSS resta legata alle attrezzature e ai servizi messi a disposizione dai vari ministeri. Questa situazione è rispecchiata nel rilascio dei brevetti (chiamati in URSS « certificati di riconoscimento d'autore »). Un'analisi dei brevetti concessi in un periodo campione di 6 mesi ha mostrato che circa il 52 % di essi sono stati rilasciati a istituzioni di R & S dipendenti dai ministeri e solo il 14 % circa a imprese industriali.

La centralizzazione della R & S industriale è un retaggio della fortissima spinta all'industrializzazione che fu impressa all'Unione Sovietica agli inizi degli anni trenta. Essa permise al governo di concentrare la scarsa disponibilità di personale scientifico e tecnico, di importare il *know-how* dall'estero e di procedere rapidamente nella pianificazione e progettazione di centrali elettriche, fabbriche, industrie e prodotti su scala nazionale. Negli ultimi dieci anni, tuttavia, è diventato sempre più evidente per la comunità scientifica e per il governo che un sistema nato per sviluppare un'economia largamente sottosviluppata per mezzo di una rivoluzione industriale su vasta scala, ma rudimentale, non è necessariamente appropriato per l'attuale livello di industrializzazione raggiunto dall'Unione Sovietica, soprattutto

Il lancio del Soyuz 4, effettuato il 14 gennaio scorso, è stato trasmesso dalla televisione sovietica. Il Soyuz 4, con un cosmonauta a bordo, ha più tardi agganciato in orbita il Soyuz 5, che portava 3 cosmonauti. Due degli uomini del Soyuz 5 si sono trasferiti a bordo del Soyuz 4, poi le due navicelle spaziali sono felicemente atterrate.

quando esso deve far fronte al rapido mutamento tecnologico e vuole superare gli Stati Uniti sia nella tecnologia sia nell'economia. In centinaia di articoli e discorsi di autocritica, rappresentanti dell'industria, scienziati e uomini politici hanno recentemente sottolineato l'urgenza di colmare l'ampio divario tecnologico che esiste fra URSS e Stati Uniti in molti settori industriali.

È in questo contesto generale che i politici sovietici hanno avviato negli ultimi dieci anni una massiccia riorganizzazione del sistema di R & S. La ristrutturazione ha due scopi principali: accrescere l'efficienza della ricerca, migliorandone il coordinamento, e perfezionare il sistema di trasferimento dei risultati della ricerca allo sviluppo industriale.

Da piú di 30 anni i ricercatori sovietici hanno ripetutamente lamentato la mancanza di coordinamento nella ricerca. Si è scritto molto a questo proposito, deplorando l'esistenza di considerevoli duplicazioni di ricerche e le scarse comunicazioni fra le diverse istituzioni di ricerca. La responsabilità della ricerca è stata ripartita fra l'insieme delle istituzioni facenti capo al sistema delle accademie e quelle dipendenti dal sistema settoriale; essa è stata poi ulteriormente suddivisa all'interno di ciascun sistema. È mancato un controllo unificato delle spese per la scienza; gli stessi fondi hanno avuto varia provenienza, in massima parte dal bilancio centrale dello stato, ma anche in parte dall'industria e, nell'ambito del bilancio dello stato, le spese per la Ricerca e Sviluppo sono state ripartite sotto varie voci.

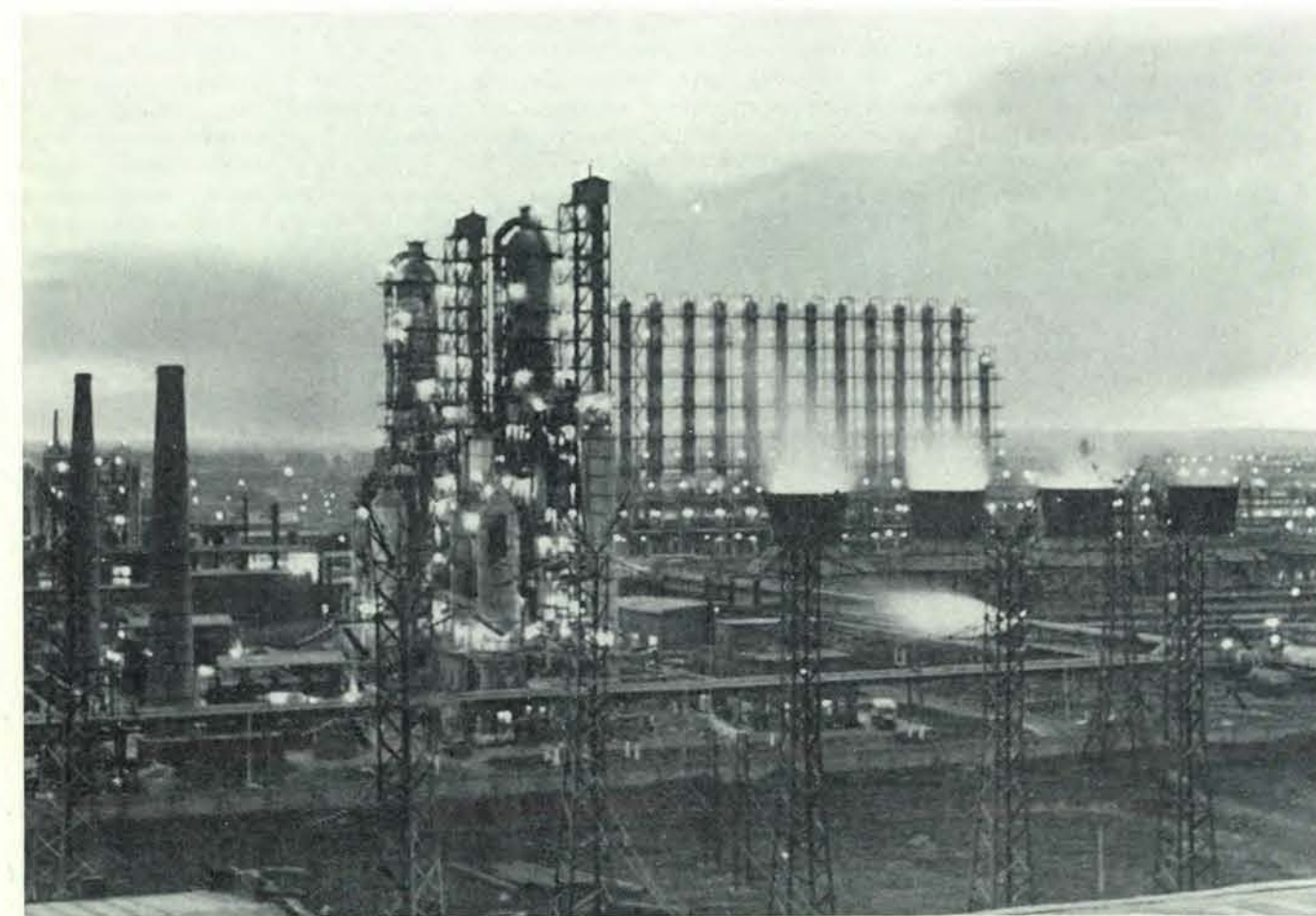
Un primo passo importante verso un migliore coordinamento fu effettuato durante la seconda guerra mondiale, quando l'URSS, come gli Stati Uniti, costituí grandi organizzazioni, rette dal ministero della Difesa, per la realizzazione di alcuni importanti progetti. L'organizzazione piú importante fu l'equivalente sovietico del progetto Manhattan americano, a capo del quale era il maggiore generale Leslie R. Groves; nel 1943 l'URSS avviò un programma per la realizzazione di una bomba atomica sotto il controllo di un Consiglio scientifico e tecnico, il cui presidente era un noto dirigente industriale e il vicepresidente un fisico nucleare di primo piano, Igor V. Kurchatov. La funzione di Kurchatov era analoga a quella di J. Robert Oppenheimer. Dopo la guerra l'URSS ha effettuato parecchi tentativi per organizzare un ente coordinatore della Ricerca e Sviluppo; il problema, però, risultò essere di cosí difficile soluzione, che non si riuscí a costituire una valida organizzazione prima del 1961. Il Comitato di stato per il coordinamento della ricerca scientifica, istituito in quell'anno, è stato riorganizzato nel 1965 come Comitato di stato per la scienza e la tecnologia, e questo organismo ha oggi la direzione di tutta la ricerca applicata e lo sviluppo.

Tale organismo è presieduto da Vladimir A. Kirillin, un famoso studioso di termodinamica, che gode della fiducia degli ambienti politici e scientifici. Il Comitato per la scienza e la tecnologia ha numerosi dipartimenti che si occupano di specifici settori economici, del coordinamento e del finanziamento della R & S. Il Comitato però ha incontrato innumerevoli difficoltà nell'influenzare la direzione delle attività scientifiche e nell'istituire un sistema generale di coordinamento. Di conseguenza, piuttosto che tentare di pianificare tutte le spese di ricerca, dal 1965 esso si è concentrato su un ristretto numero di problemi scientifici e tecnici. Il Comitato ha presentato anche dei progetti di pianificazione a lungo termine della ricerca.

Fra i progetti a lungo termine vi sono studi sulle risorse nazionali di combustibile e di energia e sullo sviluppo di un sistema integrato di trasporti, effettuati da commissioni i cui rapporti sono stati approvati dal governo in linea di principio. Per i problemi a breve termine, il Comitato di stato per la scienza e la tecnologia ha cercato di programmare, piuttosto che su periodi di un anno, almeno su periodi di 5 anni o anche superiori. Il suo piano per il periodo 1966-1970 riguarda circa 250 problemi, che includono la progettazione di centrali elettriche, la costruzione di una linea di trasporto di energia da 1500 chilovolt dal Kazakhistan al centro della Russia europea, e l'avvio della creazione di un sistema automatizzato su scala nazionale per la registrazione e il controllo dell'offerta di materiali e di macchinario. Ciascun piano di coordinamento copre l'intero processo dalla ricerca alla produzione, e assicura il necessario funzionamento al progetto.

Non è ancora chiaro quanto siano stati efficaci questi recenti mutamenti. Dal momento che il sistema economico dell'URSS è fatto funzionare su base annuale, cioè anno per anno, per mezzo di un piano centrale dettagliato, il tentativo del Comitato di trascurare i progetti minori e di rifarsi alla pianificazione annuale è andato incontro a critiche considerevoli. I funzionari del GOSPLAN hanno lamentato il fatto che tale politica « ha prodotto un deterioramento sostanziale per quanto riguarda la pianificazione della R & S » e ha portato come conseguenza il declino nei risultati della R & S dei ministeri industriali. La ricerca fondamentale resta sotto la giurisdizione dell'Accademia delle scienze, che ha piena responsabilità del coordinamento e della pianificazione per le scienze umanistiche e naturali. Il Praesidium (organo direttivo) dell'Accademia ha il compito di preparare un piano generale su scala nazionale per tutta la ricerca in questi campi, dovunque essa sia intrapresa. La responsabilità del piano generale per la ricerca scientifica è affidata a quattro sezioni in cui è ora divisa l'Accademia, a capo di ciascuna delle quali vi è un vicepresidente con estesi poteri (le sezioni sono: fisica e matematica, chimica e biologia, scienze sociali, scienze della Terra).

In pratica gli sforzi dell'Accademia per coordinare la ricerca fondamentale hanno incontrato molte difficoltà. Alcuni procedimenti formali per prepa-

Il calcolatore elettronico M-220 A, uno degli ultimi modelli sovietici. L'URSS sta studiando il modo di installare un sistema di calcolatori esteso a tutto il paese per controllare il flusso delle materie prime, dei prodotti intermedi e dei beni finiti.

L'impianto petrolchimico di Sterlitamak, nella Repubblica del Bashkir, è uno dei piú grandi progetti del decennio passato. Uno dei principali prodotti è la gomma sintetica « naturale » (poliisoprene). Negli ultimi dodici anni l'URSS ha attribuito notevole priorità alla produzione della gomma sintetica e prodotti affini. Nel periodo 1959-65 la produzione di questi materiali è aumentata in media del 19 % l'anno, rispetto al tasso di incremento del 9 % circa dell'industria in generale.

La sala di controllo della centrale atomica di Novo-Voronezh, che ha una potenza di 365 megawatt. L'URSS ha messo in funzione la sua prima centrale atomica nel 1954.

	1956 ISTITUZIONI SCIENTIFICHE		1961 ISTITUZIONI SCIENTIFICHE		1965 ISTITUZIONI SCIENTIFICHE	
	NUMERO DI ISTITUTI	SCIENZIATI	NUMERO DI ISTITUTI	SCIENZIATI	NUMERO DI ISTITUTI	SCIENZIATI
ACCADEMIA DELLE SCIENZE DELL'URSS	195	15 716	167	19 068	193	25 471
ACCADEMIE DELLE SCIENZE DELLE REPUBBLICHE	295	8 673	401	21 846	349	26 709
ACCADEMIE DIPENDENTI DAI COMITATI DI STATO E DAI MINISTERI	248	7 761	319	16 676	416	21 738
TOTALE DEL SISTEMA DELLE ACCADEMIE	**738**	**32 150**	**887**	**57 590**	**958**	**73 918**
PERCENTUALE	26,8	30,2	21,3	24,1	20,3	18,9
MINISTERI, COMITATI DI STATO, DIPARTIMENTI E CONSIGLI ECOMICI	**2018**	**74 250**	**3 285**	**180 910**	**3 766**	**316 482**
PERCENTUALE	73,2	69,8	78,7	75,9	79,7	81,1
TOTALE	**2756**	**106 400**	**4 172**	**238 500**	**4 724**	**390 400**

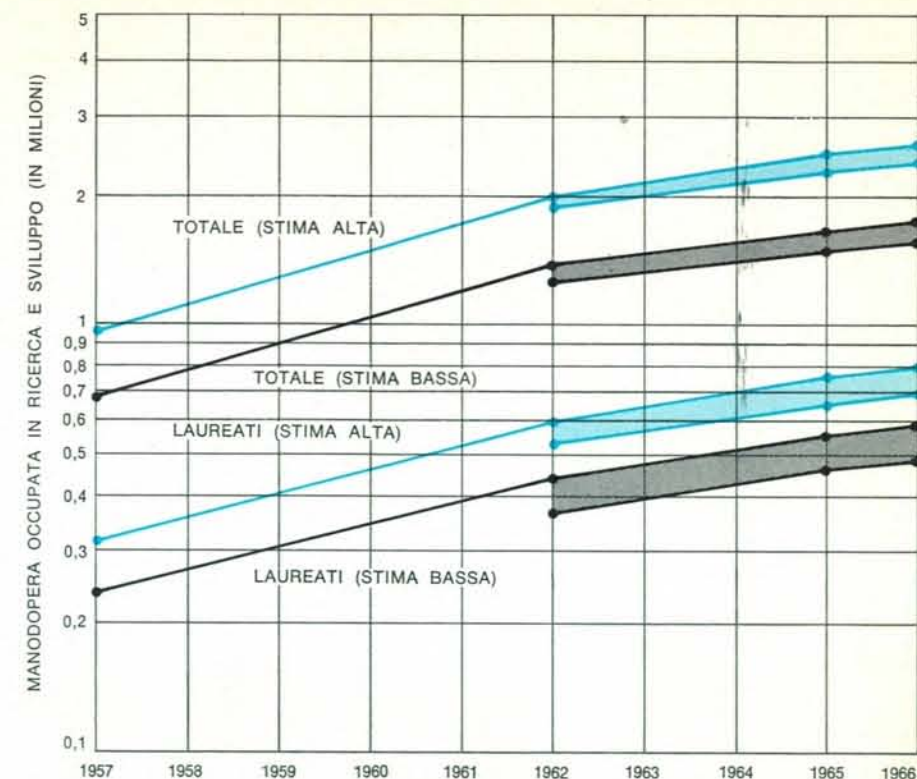
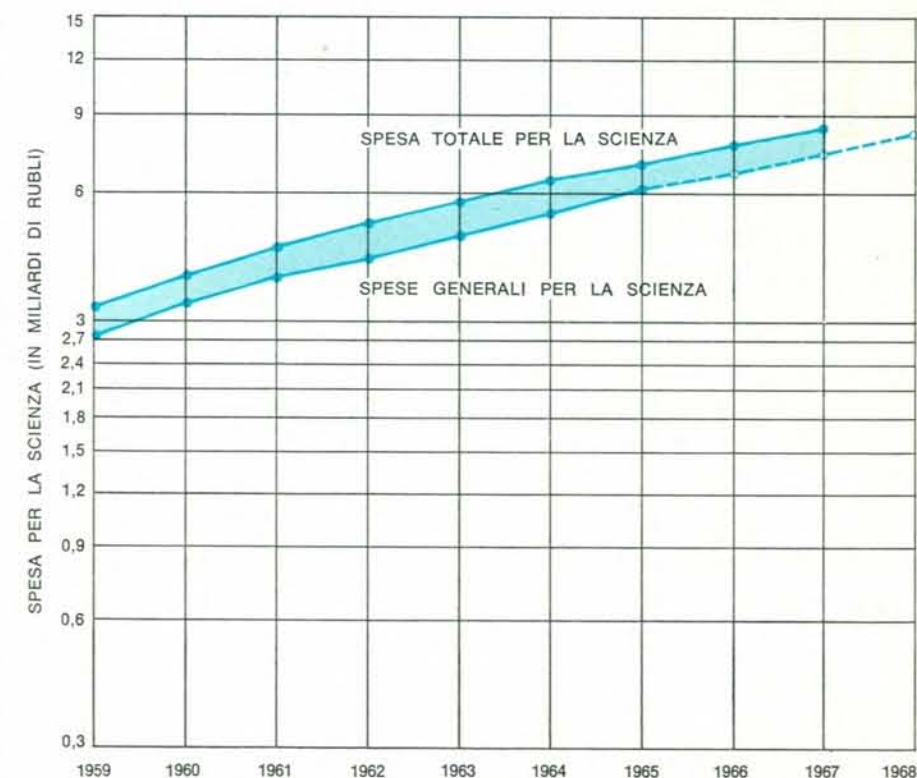
La ripartizione degli sforzi per R & S fra il sistema delle accademie e il sistema settoriale è andata gradualmente spostandosi. Nel 1956, il 26,8 % degli istituti scientifici e il 30,2 % degli scienziati erano sotto la giurisdizione delle accademie, mentre i rimanenti dipendevano dai ministeri. Dal 1965 queste percentuali sono scese rispettivamente al 20,3 e al 18,9 %, mentre il numero degli scienziati dipendenti dai ministeri si è piú che quadruplicato. All'interno del sistema delle accademie, le Accademie delle repubbliche socialiste sono cresciute molto piú rapidamente della stessa Accademia delle scienze dell'URSS.

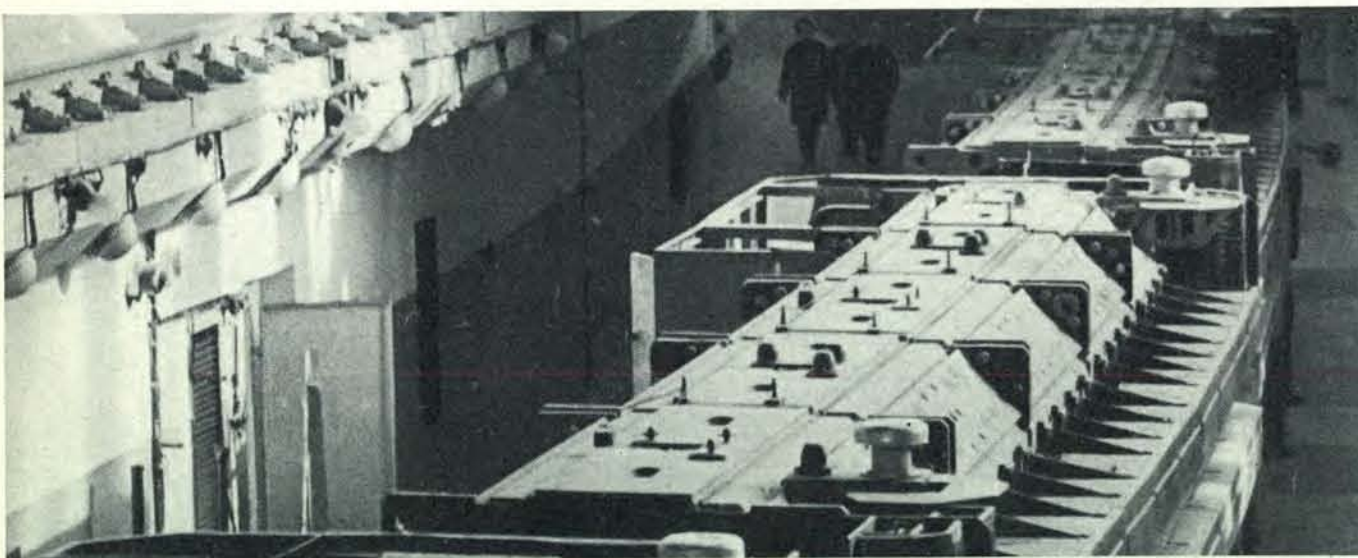
	1962 STIMA BASSA (1000)	1962 STIMA ALTA (1000)	1966 STIMA BASSA (1000)	1966 STIMA ALTA (1000)
A. PERSONALE SCIENTIFICO OCCUPATO IN R & S (INCLUSE LE SCIENZE SOCIALI E UMANISTICHE)				
1. ISTITUZIONI SCIENTIFICHE, ORGANIZZAZIONI DI PROGETTAZIONE CHE NON EFFETTUANO COSTRUZIONI				
a. SCIENZIATI	299	299	418	418
b. PERSONALE AUSILIARIO	780	1140	950	1406
c. TOTALE	**1079**	**1439**	**1368**	**1824**
2. ORGANIZZAZIONI DI PROGETTAZIONE E DI VALUTAZIONE DI PROGETTI	45	45	53	53
3. ISTITUZIONE DI ISTRUZIONE SUPERIORE				
a. SCIENZIATI	45	45	59,5	59,5
b. PERSONALE AUSILIARIO	45	45	59,5	59,5
c. TOTALE	**90**	**90**	**119**	**119**
4. PERSONALE OCCUPATO IN R & S PRESSO LE IMPRESE	**150**	**300**	**198**	**396**
5. STUDENTI RICERCATORI	49	49	73	73
TOTALE	**1413**	**1923**	**1811**	**2465**
B. PERSONALE SCIENTIFICO OCCUPATO NELLE SCIENZE SOCIALI E UMANISTICHE				
1. a. SCIENZIATI	41	41	65	65
b. PERSONALE AUSILIARIO	27	39	37	55
c. TOTALE	**68**	**80**	**102**	**120**
3. a. SCIENZIATI	19	19	26	26
b. PERSONALE AUSILIARIO	10	10	13	13
c. TOTALE	**29**	**29**	**39**	**39**
5. STUDENTI RICERCATORI	**12**	**12**	**15**	**15**
TOTALE	**109**	**121**	**156**	**174**
PERSONALE SCIENTIFICO OCCUPATO IN R & S (ESCLUSE LE SCIENZE SOCIALI E UMANISTICHE)	*1304*	*1802*	*1655*	*2291*

Il totale della manodopera occupata in R & S nel 1966 era di 1 811 000 unità secondo una stima prudente, oppure di 2 465 000 unità secondo una stima piú alta. Entrambi questi valori sono di circa il 28 % superiori a quelli analoghi per il 1962. Il numero di lavoratori formalmente indicati come « scienziati » è uguale per tutte e due le stime; la differenza sta nel numero del personale ausiliario. Non vi sono dati comparabili per gli Stati Uniti; secondo una stima fornita dalla National Science Foundation, il numero degli ingegneri e degli scienziati occupati in R & S nel 1966 ammontava a 520 500 unità. Nelle scienze sociali e umanistiche è occupata, nell'Unione Sovietica, una percentuale del personale totale della R & S fra il 7 e il 9 %.

rare i piani di ricerca sono eccessivamente burocratizzati, mentre risulta che l'influenza dell'Accademia sugli altri istituti impegnati nella ricerca scientifica fondamentale (i VUZy e le altre accademie) è piuttosto debole. Vi sono, tuttavia, alcuni segni di miglioramento nel coordinamento della ricerca.

Negli ultimi anni l'URSS ha sempre piú incoraggiato quella che in alcuni paesi occidentali è chiamata ricerca fondamentale orientata, cioè la deliberata ricerca di conoscenze di base specificamente richieste per il raggiungimento di uno scopo particolare. Una proporzione crescente dei fondi destinati alla scienza viene dirottata verso progetti speciali nei quali diverse discipline sono impegnate su un particolare problema. Un esempio tipico è un vasto progetto ora in corso per lo studio delle risorse alimentari estraibili dall'oceano. Il Praesidium dell'Accademia ha dapprima incaricato due delle sue divisioni di predisporre, in collaborazione con il ministero della Pesca, un programma degli studi necessari. Dopo aver ricevuto un rapporto preliminare quale risultato di questi studi, l'Accademia ha incaricato alcuni suoi istituti di intraprendere specifici progetti di ricerca e, nello stesso tempo, ha anche richiesto a tre organismi indipendenti (il ministero della Pesca, il ministero dell'Istruzione Superiore e l'Accademia delle scienze dell'Ucraina) di effettuare alcuni studi al riguardo. L'Accademia centrale ha affidato la responsabilità del coordinamento di tutta questa attività di ricerca a uno dei suoi consigli consultivi.

L'introduzione dei programmi di ricerca orientata non sembra aver diminuito seriamente l'indipendenza o l'autonomia di quegli scienziati dell'Accademia che stanno perseguendo attività di ricerca di base. Negli stanziamenti di ogni singolo istituto dell'Accademia, una determinata parte del bilancio è specificamente destinata alla ricerca completamente libera. Anche nell'ambito degli stanziamenti assegnati in modo specifico a progetti determinati, il direttore dell'istituto e i ricercatori a cui è affidata la ricerca hanno in pratica un considerevole margine discrezionale per decidere sull'effettivo programma di studio. Inoltre, la comunità scientifica nell'URSS esercita una influenza sulla politica scientifica del governo. Il Comitato centrale del Partito Comunista ha come membri molti scienziati dell'Accademia delle scienze, e i posti chiave nella direzione amministrativa di tutto il sistema nazionale di R & S sono occupati da scienziati

La manodopera scientifica sovietica è andata crescendo dal 1957 a un tasso annuo dell'11,5 %, che si usi la stima bassa o la alta. Questi diagrammi logaritmici mostrano comunque che i tassi di incremento sono andati declinando lievemente; se l'incremento fosse stato costante le linee non avrebbero subito una leggera flessione. Le zone in colore indicano la parte di manodopera occupata nelle scienze sociali e umanistiche.

Le spese sovietiche per la scienza si sono sviluppate a un tasso del 12 % annuo circa. La zona in colore rappresenta gli investimenti in attrezzature; le linee a tratti indicano le spese pianificate. La spesa effettiva totale per R & S nel 1967 è stata di 8,21 miliardi di rubli. Si stima che il rublo abbia un potere d'acquisto per ricerca e sviluppo nell'URSS pari a circa 2,5-3,5 dollari (nonostante la parità al cambio ufficiale). La spesa sovietica per la scienza è compresa quindi fra 20,5 e 28,7 miliardi di dollari.

L'aereo supersonico TU-144 ha effettuato il suo primo volo nel dicembre 1968, parecchie settimane prima dell'analogo prototipo franco-inglese, il Concorde. Il TU-144 può trasportare 120 passeggeri a una velocità di circa 1500 miglia orarie.

L'acceleratore di particelle di Serpukhov, vicino a Mosca, è due volte piú grande di qualsiasi altro acceleratore esistente. Entrato in funzione lo scorso anno, esso può accelerare protoni fino a un'energia di 76 miliardi di elettronvolt.

piuttosto che da amministrativi o politici di professione. Norman Kaplan, un sociologo americano che ha studiato l'amministrazione delle ricerche mediche nell'URSS, ha trovato che in questo settore gli istituti di ricerca sono meno soggetti al controllo, da parte di amministratori di estrazione non scientifica, di quanto lo siano i corrispondenti istituti negli Stati Uniti.

Quali sono i progressi che l'URSS ha compiuto in relazione al secondo principale problema, cioè quello della applicazione pratica dei risultati delle sue ricerche per la realizzazione di nuovi prodotti e nuovi processi industriali? Questo aspetto ha ricevuto anche piú attenzione di quello relativo al coordinamento della ricerca. Tutti sono d'accordo nel riconoscere che lo sviluppo, cioè la parte della ricerca piú immediatamente legata alla fase industriale, è debole, e che anche quando le innovazioni industriali sono effettivamente sviluppate, il loro processo di diffusione nell'economia nel suo insieme avviene con troppa lentezza.

Sembra che due fattori abbiano contribuito al determinarsi di questa situazione. Il primo è la carenza organizzativa che abbiamo precedentemente descritto: la separazione fra gli istituti di ricerca delle accademie e la rete industriale di R & S, la frammentazione delle responsabilità nella rete industriale di R & S fra molti ministeri diversi, e la separazione delle fabbriche a loro volta dagli istituti centrali dei ministeri. I dirigenti delle imprese industriali sovietiche si lamentano frequentemente del fatto che gli istituti dell'Accademia non tengono nel dovuto conto le necessità dell'industria e che i gruppi di ricerca e progettazione degli istituti ministeriali dedicano troppo poca attenzione alle concrete esigenze a livello della fabbrica o ai bisogni del consumatore (del resto anche in Occidente simili inconvenienti sono spesso segnalati). Il secondo fattore che rende difficoltosa l'applicazione dei risultati della ricerca è il rigido orientamento della pianificazione economica sovietica verso la produzione piuttosto che verso l'innovazione. I ministeri industriali e le fabbriche vengono valutati in primo luogo dalla capacità di far fronte agli obiettivi di produzione per essi fissati rimanendo nei limiti di costo previsti. Come conseguenza i ministeri hanno contenuto le spese per lo sviluppo e per le applicazioni commerciali di nuovi procedimenti e nuovi prodotti, e le direzioni di fabbrica si sono opposte alle innovazioni quando la loro introduzione poteva interrompere o rallentare il flusso della produzione.

Seri tentativi per eliminare questi ostacoli sono stati fatti nell'ultimo decennio. Dal 1961 un piano annuale per l'introduzione dei risultati della ricerca nell'industria è stato incorporato nel piano economico annuale nazionale. Questo ha costretto a prestare maggiore attenzione al bisogno di innovazione, ma si è mostrato, a dir poco, uno strumento inadatto, determinando le difficoltà che abbiamo precedentemente ricordato. Le autorità sovietiche hanno allora cercato di cambiare la struttura di fondo delle istituzioni di R & S create per stabilire stretti collegamenti fra R & S e produzione.

Uno di questi nuovi esperimenti organizzativi è un centro di fabbrica, dove gli istituti di ricerca, gli uffici di progettazione e una unità produttiva costituiscono una sola unità amministrativa. Questo schema ha trovato applicazione, in particolare, nelle industrie di costruzioni meccaniche pesanti e di macchine utensili. Un secondo metodo, che può avere piú vasta applicazione, è quello di affiancare istituti di ricerca che lavorano in campi affini, in modo tale da costituire un complesso di ricerca e insegnamento che sia strettamente collegato alle industrie del settore. I principali esempi di istituzioni di questo tipo sono l'Istituto Politecnico di Leningrado, creato già da molto tempo, e il relativamente nuovo centro scientifico e universitario di Novosibirsk. Una terza forma di esperimento potrebbe essere definita l'azienda di ricerca, la quale lavora per l'industria, offrendo i propri servizi, che vanno dalla consulenza per il miglioramento dei processi di produzione alla progettazione e costruzione di impianti completamente nuovi, a pagamento.

Questi esperimenti sovietici ovviamente somigliano a tipi di soluzione adottati in Occidente, in particolare negli Stati Uniti; la grande impresa industriale con la sua complessa organizzazione di R & S, l'università con i laboratori che effettuano attività di ricerca applicata in stretto collegamento con l'industria, l'azienda di ricerca che effettua ricerche su contratto per vari produttori industriali, le società di costruzioni meccaniche che progettano e costruiscono impianti. Tutte queste nuove soluzioni sono adottate nell'Unione Sovietica in modo prudente, facendo attenzione a mantenere le precipue caratteristiche della R & S sovietica: operazioni su vasta scala, con le economie che ne derivano, e capacità di concentrazione degli sforzi sui principali obiettivi nazionali.

Questi ingegnosi e promettenti esperimenti per realizzare una piú stretta unione a livello organizzativo fra ricerca e produzione non hanno però risolto per l'URSS il problema di fornire incentivi all'innovazione in tutti i settori dell'economia, né quello di realizzare, tramite la ricerca, prodotti che rispondono direttamente alle esigenze dell'industria. A tale scopo sono state approvate due proposte che si tenta ora di mettere in pratica. Una consiste in un sistema di contratti che consentono agli utilizzatori dei prodotti di aver maggior voce in capitolo nella direzione della ricerca. Una larga parte delle risorse per la R & S non saranno attribuite direttamente all'ente di ricerca dal bilancio statale, ma saranno messe a disposizione di ministeri o di singole imprese che ordineranno lo sviluppo e la progettazione di determinati prodotti. L'altra proposta è che una maggiore competizione venga introdotta nelle attività di R & S. Nessuna istituzione deve avere il monopolio su un particolare problema o in un campo specifico. Ci si aspetta che la competizione fra le organizzazioni di R & S porti a una piú grande fertilità di idee e di prodotti nuovi. La competizione, comunque, dovrebbe essere limitata allo stadio dei modelli o al massimo dei prototipi; il sistema sovietico, si fa notare, deve evitare inutili duplicazioni di attrezzature produttive caratteristiche del sistema capitalistico.

Queste proposte, seppure importanti, rappresentano soltanto un piccolo passo verso l'effettiva promozione dell'innovazione. Esse lasciano ancora l'ultima responsabilità per l'approvazione e il funzionamento di nuovi procedimenti e nuovi prodotti agli uffici governativi di pianificazione e ai ministeri industriali. Queste proposte si occupano solo dei primi stadi dell'innovazione, ma non toccano il punto cruciale dell'incoraggiamento alla produzione commerciale. A lungo termine il governo sovietico intende risolvere queste difficoltà con un uso assai piú ampio dell'incentivo al profitto per incoraggiare le imprese industriali al rinnovamento tecnologico, ma ogni progresso in questa direzione è stato ostacolato dal sistema dei prezzi vigente in URSS. I prezzi assegnati dallo stato ai nuovi prodotti molto spesso non coprono i costi iniziali delle attrezzature e del lancio dei prodotti sul mercato, e sono certamente insufficienti a incoraggiare le ditte industriali a introdurre di propria iniziativa nuovi prodotti. Un certo numero di economisti sovietici hanno, quindi, proposto che i prezzi per i nuovi prodotti, invece di essere fissati da un organismo centrale di stato, siano negoziati fra il produttore e il consumatore, permettendo cosí alla forza della domanda di mercato di operare a favore dell'innovazione.

Accanto alla ricerca di incentivazione economica per le organizzazioni di R & S e per le imprese industriali, i politici e i pianificatori sovietici stanno ora facendo strenui sforzi per offrire incentivi economici individuali a scienziati, ingegneri e lavoratori impegnati nella produzione, per incoraggiare le invenzioni e la loro rapida applicazione industriale. Considerevole uso si sta facendo, per esempio, di premi promessi in anticipo sia a scienziati e progettisti per il pronto compimento di progetti di ricerca, sia ai lavoratori delle fabbriche per il positivo sviluppo di nuovi procedimenti o prodotti.

La teoria, o assunto, che sembra stare alla base del forte accento posto sull'incentivazione economica sia per le organizzazioni sia per gli individui, è che il guadagno ricavato dalle invenzioni e dalle loro applicazioni debba essere usato per creare un meccanismo automatico di stimolo all'innovazione. Paradossalmente i *leaders* sovietici sembrano propensi a nutrire, all'interno della pianificazione governativa, una fiducia nell'incentivazione economica e nella spinta al profitto per l'individuo almeno pari a quella che la maggior parte degli economisti ritengono valida nelle economie occidentali, basate sull'iniziativa privata. L'esperienza occidentale sembrerebbe indicare che i premi individuali non possono essere facilmente posti in relazione al destino di specifici progetti. È anche sufficientemente chiaro che la forte enfasi sulla R & S e sull'innovazione posta dalle grandi compagnie industriali negli Stati Uniti non può essere interamente spiegata dai piú alti prezzi che possono essere ottenuti per mezzo di nuovi prodotti. Gran parte della motivazione per una efficace R & S nasce dalla situazione competitiva: le compagnie devono continuamente sviluppare nuovi processi e nuovi prodotti per prevenire la concorrenza e per mantenere la loro parte del mercato. D'altra parte, in molti ambienti qualificati dei paesi occidentali si crede che la spinta della competizione non sia piú efficace a promuovere l'innovazione in molti campi, e che di conseguenza siano necessarie nuove relazioni economiche fra governo e industria e nuovi metodi di organizzazione della ricerca a livello governativo. In conclusione, gli sforzi che saranno effettuati nei prossimi anni da entrambe le parti – nell'URSS e nei paesi occidentali – per individuare soddisfacenti forme organizzative della R & S e per promuovere validi incentivi all'innovazione saranno indubbiamente di notevole interesse reciproco.

Verità e dimostrazione

L'antinomia del mentitore, noto ostacolo a una definizione di verità nei linguaggi naturali, è usata costruttivamente nei linguaggi formalizzati per concludere che non tutte le proposizioni vere possono essere dimostrate

di Alfred Tarski

L'argomento di questo articolo non è nuovo. Esso è stato trattato molto di frequente nella moderna letteratura logica e filosofica, e non sarebbe facile portare qualche contributo originale alla discussione. Per molti lettori, temo, nessuna delle idee avanzate in questo articolo risulterà essenzialmente nuova. Nondimeno, la mia speranza è che essi possano trovare qualche interesse nella maniera in cui il materiale è stato disposto e articolato.

Come indica il titolo, intendo qui esaminare due concetti diversi ma connessi fra loro: il concetto di verità e quello di dimostrazione. L'articolo si divide in tre paragrafi; nel primo viene trattato il concetto di verità, nel secondo il concetto di dimostrazione e nel terzo si considerano le relazioni fra questi due concetti.

Il concetto di verità

Il compito di spiegare il significato del termine « vero » sarà qui interpretato in modo restrittivo. Il concetto di verità compare in molti contesti diversi e ci sono varie categorie di oggetti alle quali può essere riferito il termine « vero »: in un contesto psicologico si può parlare sia di emozioni vere sia di credenze vere; in un contesto estetico si può analizzare la verità interiore di un oggetto d'arte. Ma in questo articolo ci interessa solo ciò che potrebbe chiamarsi il concetto logico di verità. Piú esattamente ci interessa esclusivamente il significato della parola « vero » usata in riferimento a una proposizione. Presumibilmente, questo era appunto l'uso originale del termine « vero » nel linguaggio umano. Le proposizioni vengono trattate qui come oggetti linguistici, come certe successioni finite di suoni o di segni scritti. (Naturalmente non tutte le successioni siffatte sono proposizioni). Inoltre, quando parleremo di proposizioni intenderemo sempre quelle che in grammatica sono chiamate proposizioni dichiarative, e non altri tipi di proposizioni come ad esempio quelle interrogative o imperative.

Ogni volta che si precisa il significato di un termine tratto dal linguaggio quotidiano, si dovrebbe tener presente che lo scopo e lo status logico di una tale spiegazione può variare da un caso all'altro. Per esempio, la spiegazione può essere intesa come un resoconto dell'uso effettivo del termine in questione e in tal caso ha senso domandarsi se il resoconto sia corretto. In altri casi la spiegazione può essere di natura normativa, ossia può essere fornita come indicazione circa l'uso del termine in modo ben definito, senza tuttavia pretendere che il suggerimento si adegui al modo in cui il termine viene effettivamente usato nella pratica; una tale spiegazione può essere valutata, per esempio, dal punto di vista della sua utilità anziché da quello della sua correttezza. E si potrebbe continuare. La spiegazione che daremo noi partecipa, entro certi limiti, di entrambi gli aspetti. Ciò che viene proposto può essere trattato, in linea di principio, come suggerimento di usare il termine « vero » in un certo modo definito, ma, al tempo stesso, ci conforta l'opinione che la nostra proposta sia in accordo con l'uso corrente del termine nel linguaggio quotidiano.

La nostra interpretazione del concetto di verità si accorda nella sostanza con varie spiegazioni di tale concetto che si trovano nella letteratura filosofica. La piú antica spiegazione si trova forse nella *Metafisica* di Aristotele:

> **Dire di ciò che è che non è, o di ciò che non è che è, è falso, mentre dire di ciò che è che è o di ciò che non è che non è, è vero.**

Qui e in quanto segue la parola « falso » ha lo stesso significato dell'espressione « non vero » e può essere da questa sostituita.

Il contenuto intuitivo della formulazione aristotelica risulta piuttosto chiaro. Tuttavia la formulazione lascia alquanto a desiderare dal punto di vista della precisione e della correttezza formale. Anzitutto non è sufficientemente generale; essa si riferisce solo a proposizioni che « dicono », di qualche cosa, « che è » o « che non è »; nella maggior parte dei casi sarebbe ben difficile far rientrare una proposizione in questo schema senza distorcerne il senso e forzare lo spirito del linguaggio. Questa è forse una delle ragioni per cui nella filosofia moderna sono state proposte varie alternative a quella di Aristotele. Come esempi citiamo i seguenti:

> **Una proposizione è vera se denota lo stato di cose esistente.**

> **La verità di una proposizione consiste nella sua corrispondenza con la realtà.**

Grazie all'uso di termini filosofici tecnici, queste formulazioni hanno indubbiamente un tono molto « dotto ». È tuttavia mia impressione che una volta analizzate piú da vicino, le nuove formulazioni risultino meno chiare e piú ambigue di quella avanzata da Aristotele.

La concezione della verità che trova la sua espressione nella formulazione aristotelica (e in altre piú recenti formulazioni a essa collegate) viene di solito chiamata *classica* o *concezione semantica della verità*. Per semantica si intende quella parte della logica che, grosso modo, tratta le relazioni fra gli oggetti linguistici (quali le proposizioni) e ciò che tali oggetti esprimono. Il carattere semantico del termine « vero » viene chiaramente rilevato dalla spiegazione proposta da Aristotele e da alcune formulazioni che daremo piú avanti. A volte si parla della teoria basata sulla concezione classica come della teoria corrispondentistica della verità.

(Nella moderna letteratura filosofica sono state trattate anche altre concezioni e teorie della verità, come la concezione pragmatica e la teoria della coerenza. Queste concezioni sembrano avere carattere esclusivamente normativo e hanno scarsa connessione con l'uso effettivo del termine « vero »; nessuna di esse è stata finora formulata con un minimo di chiarezza e precisione. Nel presente articolo esse non verranno esaminate.)

Cercheremo qui di ottenere una piú precisa spiegazione del concetto classico di verità, una che possa superare la formulazione aristotelica pur conservandone gli intenti di fondo. A questo scopo, dovremo ricorrere ad alcune tecniche della logica contemporanea e dovremo specificare il linguaggio nel quale sono formulate le proposizioni che ci interessano. Ciò è necessario, non fosse altro per la ragione che una successione di suoni o di segni che in un linguaggio sia una proposizione vera o falsa, ma comunque sensata, può risultare priva di significato in un altro linguaggio. Per il momento supponiamo che il linguaggio che ci interessa sia l'italiano.

Cominciamo con un problema semplice. Consideriamo una proposizione italiana il cui significato non dia adito a dubbi, per esempio « la neve è bianca ». Per brevità denotiamo questa proposizione con « S », cosicché « S » diventa il nome di una proposizione. Ci domandiamo: cosa intendiamo dicendo che S è vera o che è falsa? La risposta è semplice: in conformità con la spiegazione aristotelica, dicendo che S è vera intendiamo semplicemente che la neve è bianca, e dicendo che S è falsa intendiamo che la neve non è bianca. Eliminando il simbolo « S » arriviamo alla seguente formulazione:

(1) **« La neve è bianca » è vera se e solo se la neve è bianca.**

(1') **« La neve è bianca » è falsa se e solo se la neve non è bianca.**

Cosí la (1) e la (1') forniscono spiegazioni soddisfacenti del significato dei termini « vero » e « falso » quando questi termini sono riferiti alla proposizione « la neve è bianca ». Possiamo considerare la (1) e la (1') come definizioni parziali dei termini « vero » e « falso », anzi come definizioni di questi termini in relazione a una particolare proposizione. Si noti che la (1), cosí come la (1'), ha la forma richiesta dalle regole della logica per una definizione, precisamente la forma di una equivalenza logica: essa consta di due parti, il primo e il secondo membro dell'equivalenza, collegati dal connettivo « se e solo se ». Il primo membro è il *definiendum*, la frase il cui significato viene spiegato dalla definizione; il secondo membro è il *definiens*, la frase che fornisce la spiegazione. Nel nostro caso il *definiendum* è la seguente espressione:

« la neve è bianca » è vera;

il *definiens* ha la forma:

« la neve è bianca ».

Può sembrare a prima vista che la (1), considerata come definizione, presenti una pecca essenziale ampiamente discussa nella logica tradizionale: un circolo vizioso; e ciò perché alcune parole, per esempio « neve », compaiono sia nel *definiens* sia nel *definiendum*. In realtà, tuttavia, la parola compare nel primo caso con carattere essenzialmente diverso che nel secondo. La parola « neve » è una parte sintattica o organica del *definiens*; precisamente, il *definiens* è una proposizione il cui soggetto è appunto « neve ». Anche il *definiendum* è una proposizione, ed esprime il fatto che il *definiens* è una proposizione vera. Il suo soggetto è un nome del *definiens*, ottenuto mettendo il *definiens* stesso fra virgolette. (Quando si predica qualcosa di un oggetto, si usa sempre il nome di questo oggetto e non l'oggetto stesso: questo vale anche per gli oggetti linguistici.) Per varie ragioni un'espressione fra virgolette va trattata come una parola sola senza parti sintattiche. Perciò la parola « neve » che indubbiamente compare nel *definiendum* come una parte, non vi compare come componente sintattica. La logica medievale direbbe che nel *definiens* « neve » compare *in suppositione formali* e nel *definiendum* compare *in suppositione materiali*. Comunque, le parole che non sono parti sintattiche del *definiendum* non possono dare luogo a un circolo vizioso, e quindi questo pericolo scompare.

Le precedenti osservazioni toccano alcune questioni che sono piuttosto sottili e tutt'altro che semplici dal punto di vista logico. Anziché soffermarsi su di esse indicherei un altro modo per dissipare ogni timore di circolo vizioso. Nel formulare la (1) abbiamo applicato un metodo comune per ottenere un nome di una proposizione, o di una qualunque espressione: quello che consiste nel mettere l'espressione fra virgolette. Il metodo ha molti pregi, ma è anche all'origine delle difficoltà discusse sopra. Per rimuovere queste difficoltà, tentiamo di adottare un altro metodo per formare nomi di espressioni e precisamente un metodo che potrebbe essere caratterizzato come una descrizione lettera per lettera di un'espressione. Usando questo metodo anziché la (1), avremmo la seguente formulazione piú tediosa:

(2) **La successione di quattro parole, la prima delle quali è la successione delle lettere Elle e A, la seconda è la successione delle lettere Enne, E, Vi ed E, la terza è costituita dalla sola lettera E accentata, e infine la quarta è la successione costituita dalle lettere Bi, I, A, Enne, Ci e A, è una proposizione vera se e solo se la neve è bianca.**

La formulazione (2) non differisce dalla (1) nel suo significato; la (1) può essere considerata semplicemente come una forma della (2). La nuova formulazione è certamente meno perspicua della vecchia, ma ha su di essa il vantaggio di non creare il sospetto di un circolo vizioso.

Naturalmente definizioni parziali di verità analoghe alla (1) oppure alla (2) possono essere formulate anche per altre proposizioni. Ciascuna di queste definizioni ha la forma:

(3) **« p » è vera se e solo se p,**

dove « p » va sostituito in ambedue i membri della (3) con la proposizione per la quale si costruisce la definizione. Si dovrebbe, tuttavia, usare particolare cura in quelle situazioni nelle quali la proposizione posta in luogo di « p » contenga la parola « vero » come parte sintattica. In tali casi la corrispondente equivalenza (3) non può essere considerata come definizione parziale di verità, giacché, se fosse considerata come tale, costituirebbe ovviamente un circolo vizioso. Anche in questi casi, tuttavia, la (1) è una proposizione sensata, anzi è addirittura vera dal punto di vista della concezione classica di verità. A titolo di illustrazione immaginiamo che in una recensione di un libro si trovi la seguente proposizione:

(4) **Non ogni proposizione in questo libro è vera.**

Applicando il criterio aristotelico si vede che la proposizione (4) è ve-

ra se, di fatto, non ogni proposizione del libro in questione è vera e che la (4) è altrimenti falsa; in altre parole, possiamo enunciare l'equivalenza ottenuta dalla (3) sostituendo la (4) in luogo di « *p* ». Naturalmente questa equivalenza si limita a enunciare le condizioni sotto le quali la proposizione (4) è vera o non vera, ma l'equivalenza da sola non ci permette di decidere quale dei due casi si verifichi in realtà. Per verificare il giudizio espresso dalla (4) uno dovrebbe leggere attentamente il libro recensito e analizzare la verità delle proposizioni in esso contenute.

Alla luce della precedente discussione possiamo ora riformulare il nostro problema centrale. Conveniamo che l'uso del termine « vero » in riferimento alle proposizioni italiane è conforme al concetto classico di verità quando e soltanto quando ci permette di stabilire ogni equivalenza della forma (3) in cui « *p* » sia sostituita in ambo i membri da un'arbitraria proposizione italiana. Se questa condizione è soddisfatta, diremo semplicemente che l'uso del termine « vero » è adeguato. Cosí il nostro problema principale è il seguente: è possibile stabilire un uso adeguato del termine « vero » per le proposizioni italiane e, in tal caso, mediante quali metodi? Naturalmente si può sollevare una questione analoga per le proposizioni di una qualsiasi altra lingua.

Il problema sarà risolto completamente se riusciremo a costruire una definizione generale di verità che sia adeguata nel senso che ne deriveranno, come conseguenze logiche, tutte le equivalenze della forma (3). Se una tale definizione è accettata dalle persone che parlano italiano, essa stabilisce ovviamente un uso adeguato del termine « vero ».

Sotto certe ipotesi particolari la costruzione di una definizione generale di verità è facile. Si supponga infatti di essere interessati non già alla lingua italiana nel suo complesso, ma solo a una sua porzione e di voler definire il termine « vero » esclusivamente in riferimento alle proposizioni di questo linguaggio parziale; chiameremo linguaggio *L* questa porzione della lingua italiana. Supponiamo inoltre che *L* venga corredato di precise regole sintattiche che ci permettano, in ciascun caso particolare, di distinguere una proposizione da un'espressione che non lo è, e che il numero di tutte le proposizioni del linguaggio *L* sia finito (eventualmente molto grande). Si supponga, infine, che la parola « vero » non compaia in *L* e che il significato di tutte le parole in *L* sia sufficientemente chiaro, sí da evitare ogni obiezione sull'uso delle medesime per definire la verità.

Sotto queste ipotesi si proceda come segue. Anzitutto prepariamo un elenco completo di tutte le proposizioni di *L*; supponiamo per esempio che ci siano mille proposizioni in *L* e conveniamo di usare i simboli « s_1 », « s_2 », ..., « s_{1000} » come abbreviazioni delle successive proposizioni dell'elenco. Poi, per ciascuna delle proposizioni « s_1 », « s_2 », ..., « s_{1000} » costruiamo una definizione parziale di verità sostituendo successivamente queste proposizioni a « *p* » in ambo i membri dello schema (3). Infine formiamo la congiunzione logica di tutte queste definizioni parziali, cioè combiniamole in un unico enunciato mettendo il connettivo « e » in mezzo a ciascuna coppia di definizioni parziali consecutive. L'unica cosa che resta da fare è di dare alla congiunzione risultante una forma diversa, ma logicamente equivalente, in modo da soddisfare i requisiti formali richiesti alle definizioni dalle regole della logica.

(5) Per ogni proposizione *x* (del linguaggio *L*), *x* è vera se e solo se
s_1, e *x* coincide con « s_1 »
oppure
s_2, e *x* coincide con « s_2 »
oppure
. . . .
oppure infine
s_{1000}, e *x* coincide con « s_{1000} ».

Siamo giunti cosí a un enunciato che può ben costituire la desiderata definizione generale di verità: essa è formalmente corretta e è adeguata nel senso che implica tutte le equivalenze della forma (3) nelle quali « *p* » è stata sostituita da una qualunque proposizione del linguaggio *L*. Notiamo, per inciso, che la (5) è una proposizione della lingua italiana, ma ovviamente non del linguaggio *L*; giacché la (5) contiene tutte le proposizioni di *L* come parti proprie, non può coincidere con alcuna di esse. Un'ulteriore disamina servirà a meglio chiarire questo punto.

Per ovvie ragioni il procedimento sopra descritto non si può applicare se si è interessati a tutta la lingua italiana, e non semplicemente a una sua porzione. Già se tentiamo di preparare un elenco completo delle proposizioni italiane, incontriamo la difficoltà che le regole della grammatica italiana non determinano in modo preciso la forma delle espressioni (successioni finite di parole) che vanno riguardate come proposizioni: un'espressione particolare, diciamo un'esclamazione, può fungere da proposizione in un dato contesto, mentre un'espressione della stessa forma non lo sarà in un contesto diverso. Di piú, l'insieme di tutte le proposizioni italiane è almeno potenzialmente infinito. È certamente vero che al momento attuale sono state pronunciate e scritte solo un numero finito di proposizioni dagli esseri umani: probabilmente nessuno sarebbe dell'avviso, però, che l'elenco di queste proposizioni esaurisca tutte le proposizioni italiane. Al contrario, vedendo un tale elenco, ciascuno di noi potrebbe facilmente esibire una proposizione italiana che non si trovi già in esso. Infine il fatto che la parola « vero » compaia nella lingua italiana è sufficiente a impedire un'applicazione del procedimento descritto sopra.

Dalle precedenti osservazioni non segue che non si possa ottenere per qualche altra via la desiderata definizione di verità per proposizioni italiane arbitrarie. C'è, tuttavia, una ragione piú seria e fondamentale che sembra precludere una tale possibilità. Di piú, la mera ipotesi che si possa trovare mediante un qualunque metodo un uso adeguato del termine « vero » (in riferimento a proposizioni italiane arbitrarie) conduce chiaramente a una contraddizione. Il ragionamento piú semplice per ottenere una tale contraddizione è noto come *antinomia del mentitore*; lo descriveremo ora brevemente.

Si consideri la proposizione:

(6) La proposizione stampata in colore a pag. 22 del numero 12 di « Le Scienze » è falsa.

Conveniamo di usare « *s* » come abbreviazione per questa proposizione. Controllando il numero di questo fascicolo e il numero di questa pagina, si riscontra facilmente che « *s* » è proprio l'unica proposizione stampata in colore a pag. 22 del numero 12 di « Le Scienze ». Ne segue in particolare che

(7) « *s* » è falsa se e solo se la proposizione stampata in colore a pag. 22 del numero 12 di « Le Scienze » è falsa.

D'altra parte « *s* » è indubbiamente una proposizione italiana. Perciò, supponendo che l'uso del termine « vero » sia adeguato, possiamo stabilire l'equivalenza (3) in cui « *p* » sia sostituito con « *s* ». Cosí possiamo affermare:

(8) « *s* » è vera se e solo se *s*.

Ricordiamo ora che « *s* » sta per l'intera proposizione (6). Quindi possiamo sostituire « *s* » con la (6) nel secondo membro della (8); si ottiene allora:

(9) « *s* » è vera se e solo se la proposizione stampata in colore a pag. 22 del numero 12 di « Le Scienze » è falsa.

Confrontando ora la (7) con la (9) si conclude:

(10) « *s* » è falsa se e solo se « *s* » è vera.

Ciò conduce a un'ovvia contraddizione: « *s* » risulta sia vera che falsa, e siamo cosí di fronte a un'antinomia. La formulazione sopra riportata dell'antinomia del mentitore è dovuta al logico polacco Jan Łukasiewicz.

Sono note anche formulazioni piú elaborate dell'antinomia. Immaginiamo, per esempio, un libro di cento pagine contenente una e una sola proposizione per ciascuna pagina. A pagina 1 si legge:

La proposizione stampata a pagina 2 di questo libro è vera.

A pagina 2 si legge:

La proposizione stampata a pagina 3 di questo libro è vera.

E cosí via fino a pag. 99. A pag. 100, l'ultima pagina del libro, troviamo:

La proposizione stampata a pagina 1 di questo libro è falsa.

Supponiamo che la proposizione stampata a pag. 1 sia davvero falsa. Mediante un ragionamento non difficile ma molto lungo e che richiede di sfogliare tutto il libro, si conclude che la nostra supposizione è errata. Di conseguenza supponiamo che la proposizione stampata a pag. 1 sia vera e, con un ragionamento altrettanto facile e lungo del precedente, ci si convince che anche la nuova supposizione è errata. Cosí ci troviamo di nuovo di fronte a un'antinomia.

Non è difficile comporre molti altri libri antinomici che siano varianti di quello descritto. Ammettiamo che ciascuno di essi abbia 100 pagine, ciascuna delle quali contenga una e una sola proposizione della forma:

La proposizione stampata a pagina *00* di questo libro è *XX*,

dove in ciascun caso particolare « *XX* » va sostituito con una delle parole « *vera* » o « *falsa* », mentre « *00* » va sostituito con uno dei numerali « 1 », « 2 », ..., « 100 »; non si esclude che lo stesso numerale compaia in piú pagine. Non è detto che ogni variante composta secondo queste regole dia effettivamente luogo a un'antinomia. Il lettore che ama i rompicapo logici non troverà difficile descrivere tutte quelle varianti che fanno al caso nostro. La seguente avvertenza può risultare utile al riguardo: si immagini che a qualche punto del libro, diciamo a pag. 1, si dica che la proposizione a pag. 3 è vera, mentre in qualche altro punto, diciamo a pag. 2, si affermi che la stessa proposizione è falsa. Da queste informazioni non segue affatto che il libro sia « antinomico »; se ne può solo dedurre che o è falsa la proposizione di pag. 1 o quella di pag. 2. Un'antinomia sorge, invece, ogniqualvolta si sia in grado di dimostrare che una delle proposizioni del libro è sia vera sia falsa, indipendentemente da ogni ipotesi sulla verità o falsità delle rimanenti proposizioni.

L'antinomia del mentitore risale all'antichità. Di solito viene attribuita al logico greco Eubulide; essa ha tormentato molti logici antichi e ha causato la morte prematura di almeno uno di essi, Fileta di Coo. Altre antinomie e paradossi furono scoperti nell'antichità, nel medioevo e in tempi recenti. Sebbene molte di esse siano ormai completamente dimenticate, l'antinomia del mentitore viene ancora analizzata e discussa negli scritti contemporanei. Assieme ad alcune recenti antinomie scoperte all'inizio del secolo (in particolare l'antinomia di Russell), essa ha avuto un grande influsso sullo sviluppo della logica moderna.

Nella letteratura sull'argomento si incontrano due modi diametralmente opposti di affrontare le antinomie. Uno è quello di ignorarle, di trattarle come sofismi, come giochi che non sono seri ma maliziosi e che mirano soprattutto a dimostrare l'ingegnosità di chi le formula. L'atteggiamento opposto è caratteristico di certi pensatori del XIX secolo e è ancora presente o lo era fino a poco tempo fa. Secondo questo modo di vedere, le antinomie costituiscono un elemento essenziale del pensiero umano: esse continueranno a comparire nelle attività intellettuali e la loro presenza è la fonte basilare del vero progresso. Come spesso accade, la verità è probabilmente una via di mezzo. Personalmente, come logico, non posso persuadermi che le antinomie siano un elemento permanente del nostro sistema di conoscenze; tuttavia non sono affatto incline a prendere le antinomie alla leggera. La comparsa di un'antinomia è per me un sintomo di malattia: partendo da premesse che sembrano intuitivamente ovvie, usando forme di ragionamento che intuitivamente sembrano sicure, un'antinomia ci conduce a conclusioni assurde, contraddittorie. Ogni volta che ciò accade, dobbiamo sottoporre i nostri modi di pensare a una revisione approfondita, rinunciare a certe premesse, alle quali credevamo, oppure migliorare certe forme di ragionamento che eravamo abituati a usare. E questo lo facciamo nella speranza non solo di liberarci dell'antinomia, ma anche di non incontrarne di nuove. A questo scopo mettiamo alla prova il nostro pensiero cosí riveduto con tutti i mezzi a disposizione, e per prima cosa cerchiamo di ricostruire la vecchia antinomia nella nuova sistemazione; queste prove costituiscono un'attività molto importante nel campo del pensiero speculativo, simile a quella di condurre a termine degli esperimenti cruciali nella scienza empirica.

Da questo punto di vista consideriamo ora in particolare l'antinomia del mentitore. Nell'antinomia interviene il concetto di verità in riferimento a proposizioni arbitrarie della lingua italiana; essa potrebbe facilmente essere riformulata in modo da applicarsi ad altri linguaggi naturali. Ci troviamo di fronte a un serio problema: come si possono evitare le contraddizioni indotte da questa antinomia? Una soluzione radicale del problema che può subito venire in mente è semplicemente quella di abolire la parola « vero » dal vocabolario italiano o per lo meno di trattenersi dall'usarla in ogni seria questione.

Coloro ai quali una tale mutilazione dell'italiano sembra altamente insoddisfacente e illegittima possono essere inclini ad accettare una soluzione di compromesso, che consiste nell'adottare ciò che potrebbe chiamarsi (secondo il filosofo polacco contemporaneo Tadeusz Kotarbinski) « la concezione nichilista della teoria della verità ». Secondo questa concezione la parola « vero » non ha un significato indipendente, ma può essere usata come componente delle due espressioni sensate « è vero che » e « non è vero che ». Queste espressioni vengono trattate come se fossero singole parole, senza parti organiche. Il significato a esse attribuito è tale che possano essere immediatamente eliminate da ogni proposizione in cui compaiano. Per esempio, anziché dire

è vero che tutti i gatti sono neri

si può semplicemente dire

tutti i gatti sono neri

e invece che

non è vero che tutti i gatti siano neri

si può dire

non tutti i gatti sono neri.

In altri contesti la parola « vero » è priva di senso. In particolare, non può essere usata come un vero predicato che qualifica nomi di proposizioni. Nella terminologia della logica medievale possiamo dire che la parola « vero » si può usare come parola sincategorematica in alcune situazioni particolari, ma non la si può mai usare in modo categorematico.

Per rendersi conto delle implicazioni di questa concezione, si consideri la proposizione che è stata il punto di partenza per il paradosso del mentitore, cioè la proposizione stampata in colore a pag. 22 di questa rivista. Dal punto di vista « nichilista » essa non è una proposizione sensata e l'antinomia semplicemente svanisce. Disgraziatamente, anche molti altri usi della parola « vero », che altrimenti sembrano pienamente legittimi e ragionevoli, restano parimenti colpiti da questa concezione. Immaginiamo, per esempio, che un certo termine che si ripete frequentemente nelle opere di un matematico antico ammetta diverse interpretazioni. Uno storico della scienza che studia tali opere giunge alla conclusione che sotto una di queste interpretazioni tutti i teoremi enunciati dal matematico risultano veri; ciò lo conduce in modo naturale alla congettura che la stessa cosa valga per ciascuno dei lavori di questo matematico che sono sconosciuti al presente ma che possono essere scoperti in futuro. Se però lo storico della scienza condivide la concezione « nichilista » della verità, perde per ciò stesso la possibilità di esprimere a parole la sua congettura. Si potrebbe dire che la teoria « nichilista » della verità rende un omaggio ipocrita a certe forme del linguaggio umano entrate nelle consuetudini, mentre in realtà abolisce l'idea di verità dal patrimonio concettuale della mente umana.

Proveremo perciò un'altra via per uscire dalla nostra situazione spiacevole, cercando una soluzione che lasci essenzialmente intatto il concetto classico di verità. L'applicabilità del concetto di verità dovrà subire alcune restrizioni, ma il concetto rimarrà disponibile almeno per gli scopi di un discorso colto.

A questo scopo dobbiamo analizzare quei tratti caratteristici del linguaggio comune che sono la fonte reale dell'antinomia del mentitore. Nel corso di questa analisi colpisce subito un aspetto notevole del linguaggio in questione: il suo carattere universale, onnicomprensivo. Il linguaggio comune è universale, né deve essere altrimenti, giacché ci si aspetta che esso fornisca i mezzi adeguati a esprimere ogni cosa che possa essere espressa, in un qualsivoglia linguaggio; esso si arricchisce di continuo per soddisfare tale requisito. In particolare il linguaggio comune è semanticamente universale nel senso seguente: accanto agli oggetti linguistici, come proposizioni e termini, che sono componenti del linguaggio, in esso sono presenti anche i nomi di tali oggetti (come sappiamo, un nome di un'espressione si può ottenere ponendo l'espressione fra virgolette); inoltre, il linguaggio contiene termini semantici quali « verità », « nome », « designazione » che, direttamente o indirettamente, si riferiscono alla relazione fra gli oggetti linguistici e ciò che essi esprimono. Di conseguenza, per ogni proposizione formulata nel linguaggio comune, possiamo formarne nello stesso linguaggio un'altra la quale esprima che la prima proposizione è vera o falsa. Con un ulteriore espediente, possiamo perfino costruire nel linguaggio ciò che talvolta vien detta una proposizione autologa, cioè una proposizione *S* che esprime il fatto che *S* stessa è vera o che è falsa. Se *S* esprime la propria falsità, si può dimostrare con un semplice ragionamento che *S* è contemporaneamente vera e falsa, e così ci ritroviamo di fronte l'antinomia del mentitore.

Si noti, tuttavia, che non in tutte le situazioni è necessario l'uso dei linguaggi universali. In particolare, tali linguaggi non sono generalmente necessari per gli scopi della scienza (e per scienza intendo qui l'intero campo dell'investigazione intellettuale). In rami particolari della scienza, diciamo nella chimica, si studiano certi oggetti particolari, come gli elementi, le molecole eccetera, ma non per esempio oggetti linguistici come proposizioni o termini. Il linguaggio che ben si adatta a tale trattazione è perciò un linguaggio ristretto con un vocabolario limitato: esso deve contenere nomi per gli oggetti chimici, termini come « elemento » e « molecola », ma non nomi per oggetti linguistici; non è perciò necessario che sia semanticamente universale. Un discorso analogo vale per la maggior parte degli altri rami della scienza. La situazione si fa un po' confusa, però, se passiamo a considerare la linguistica, ossia la scienza in cui si studiano i linguaggi: il linguaggio della linguistica deve certamente essere fornito di nomi per gli oggetti linguistici. Tuttavia non è necessario identificare il linguaggio della linguistica col linguaggio universale, né con alcuno dei linguaggi che sono oggetto di indagine linguistica, e non siamo tenuti a supporre che in linguistica si usi uno stesso linguaggio per tutte le indagini. Il linguaggio della linguistica deve contenere nomi per le componenti linguistiche dei linguaggi studiati, ma non i nomi delle sue proprie componenti; così di nuovo, non è necessario che sia semanticamente universale. Lo stesso può dirsi per il linguaggio della logica, o meglio di quella parte della logica nota come metalogica e metamatematica; anche qui abbiamo a che fare con linguaggi e in primo luogo con i linguaggi delle teorie logiche e matematiche (sebbene qui si studino tali linguaggi da un punto di vista diverso da quello della linguistica).

Ci si può chiedere ora se possa definirsi in modo preciso un concetto di verità e quindi se possa stabilirsi un uso coerente e adeguato di questo concetto, almeno per i linguaggi semanticamente limitati del discorso scientifico. Sotto certe condizioni la risposta a tale domanda risulta affermativa. Le principali condizioni imposte al linguaggio sono che il suo vocabolario sia completamente ed esplicitamente determinato e che siano formulate con precisione le regole sintattiche che riguardano la formazione delle proposizioni e delle altre espressioni sensate a partire dalle parole elencate nel vocabolario. Inoltre le regole sintattiche debbono essere puramente formali, cioè debbono riferirsi esclusivamente alla forma (forma esteriore) delle espressioni; la funzione e il significato di una espressione debbono dipendere esclusivamente dalla sua forma. In particolare, osservando un'espressione si deve essere in grado in ciascun caso di decidere se è una proposizione o no; non deve mai capitare che un'espressione assolva da qualche parte la funzione di proposizione mentre un'espressione della stessa forma non si comporti così da qualche altra parte, oppure che una proposizione possa essere asserita in un certo contesto mentre una proposizione della stessa forma possa essere negata in un altro. Ne segue, in particolare, che pronomi e avverbi dimostrativi quali « questo » e « qui » non dovranno comparire nel vocabolario del linguaggio; i linguaggi che soddisfano a queste condizioni verranno detti linguaggi formalizzati. Quando si studia un linguaggio formalizzato non è necessario distinguere fra espressioni della stessa forma che sono state scritte o pronunciate in luoghi diversi; spesso se ne parla come di una stessa espressione. Il lettore può aver notato che talvolta si usa questo modo di parlare anche nel trattare un linguaggio naturale, cioè che non sia formalizzato: si fa così per semplicità e solo in quei casi in cui non sembra esserci pericolo di confusione.

I linguaggi formalizzati sono del tutto adeguati per la presentazione di teorie logiche e matematiche; non vedo alcuna ragione essenziale perché non possano venire adattati sí da poter essere impiegati in altre discipline scientifiche, e in particolare nello sviluppo delle parti teoriche delle scienze empiriche. Vorrei sottolineare che nell'usare il termine « linguaggi formalizzati » non mi riferisco esclusivamente a quei sistemi linguistici che sono formulati completamente in simboli, né penso a qualcosa di essenzialmente opposto ai linguaggi naturali. Al contrario, gli unici linguaggi formalizzati che sembrano essere di un qualche interesse reale sono quelli che sono frammenti dei linguaggi naturali (frammenti provvisti di un vocabolario completo e di precise regole sintattiche) o quelli che almeno possano essere adeguatamente tradotti nei linguaggi naturali.

Ci sono alcune condizioni ulteriori dalle quali dipende la realizzazione del nostro programma. Si dovrebbe fare una rigida distinzione fra il linguaggio che è l'oggetto del nostro studio e per il quale in particolare si vuole costruire la definizione di verità e il linguaggio nel quale la definizione deve essere formulata e le sue implicazioni studiate. Quest'ultimo verrà detto metalinguaggio e il primo linguaggio oggetto. Il metalinguaggio deve essere sufficientemente ricco; in particolare deve contenere come parte il linguaggio oggetto. Infatti secondo le nostre convenzioni una definizione adeguata di verità implicherà come conseguenze tutte le definizioni parziali di tale concetto, cioè tutte le equivalenze della forma (3):

« p » **è vera se e solo se** p,

dove « p » va sostituita in ambo i membri dell'equivalenza con una proposizione arbitraria del linguaggio oggetto. Giacché tutte queste conseguenze sono formulate nel metalinguaggio, se ne conclude che ogni proposizione del linguaggio oggetto dev'essere anche una proposizione del metalinguaggio. Inoltre, il metalinguaggio deve contenere nomi per proposizioni (e altre espressioni) del linguaggio oggetto, giacché questi nomi compaiono nel primo membro delle equivalenze del tipo (3). Esso deve anche contenere alcuni altri termini che occorrono per lo studio del linguaggio oggetto, e precisamente termini che denotino certi particolari insiemi di espressioni, relazioni fra espressioni e operazioni sulle espressioni; per esempio, deve esserci la possibilità di parlare dell'insieme di tutte le proposizioni o dell'operazione di giustapposizione, mediante la quale da due espressioni se ne forma una nuova ponendo una delle due immediatamente di seguito all'altra. Infine, nel definire la verità, si vede che i termini semantici (quelli che esprimono le relazioni tra le proposizioni del linguaggio oggetto e gli oggetti a cui tali proposizioni si riferiscono) possono essere introdotti nel metalinguaggio mediante definizioni. Se ne conclude che un metalinguaggio che fornisca mezzi sufficienti a definire la verità deve essere essenzialmente più ricco del linguaggio oggetto; esso non può coincidere né essere traducibile in quest'ultimo, giacché altrimenti ambedue risulterebbero semanticamente universali, e l'antinomia del mentitore sarebbe ricostruibile in entrambi. Ritorneremo su questa questione nell'ultimo paragrafo del presente articolo.

Se tutte le precedenti condizioni sono soddisfatte, la costruzione della desiderata definizione di verità non presenta difficoltà essenziali. Tecnicamente, tuttavia, essa è troppo complicata per essere esposta qui in dettaglio. Per ogni data proposizione del linguaggio oggetto si può facilmente formulare la corrispondente definizione parziale della forma (3). Tuttavia, giacché l'insieme di tutte le proposizioni del linguaggio oggetto è di regola infinito, mentre ogni proposizione del metalinguaggio è una successione finita di segni, non si può arrivare a una definizione generale formando semplicemente la congiunzione logica di tutte le definizioni parziali. Nondimeno, ciò che alla fine si ottiene è, in un senso intuitivo, equivalente alla immaginaria congiunzione infinita. Molto approssimativamente, si procede come segue. Dapprima si considerano le proposizioni più semplici, che non contengono altre proposizioni come parti; per queste proposizioni si trova il modo di definire la verità direttamente (usando la stessa idea che conduce alle definizioni parziali). Poi, mediante l'uso delle regole sintattiche che riguardano la formazione di proposizioni più complicate a partire da quelle più semplici, si estende la definizione a proposizioni composte arbitrarie; si applica qui il metodo conosciuto in matematica come definizione per ricursione. (Questa è, a dire il vero, una grossolana approssimazione del procedimento. Per ragioni tecniche il metodo di ricursione si applica, in realtà, non per definire il concetto di verità, ma quello a esso collegato di soddisfazione; la verità viene poi facilmente definita in termini di soddisfazione.)

Sulla base della definizione così costruita si può sviluppare l'intera teoria della verità. In particolare si possono derivare da essa, oltre a tutte le equivalenze della forma (3), alcune conseguenze di carattere generale, quali il famoso principio di non contraddizione e quello del terzo escluso. Per il primo di questi due principi, non possono essere entrambe vere due proposizioni una delle quali sia la negazione dell'altra; per il secondo principio, due proposizioni siffatte non possono essere ambedue false.

Il concetto di dimostrazione

Qualunque cosa possa ottenersi dalla costruzione di una definizione adeguata del concetto di verità per un linguaggio scientifico, una cosa è certa: la definizione non porta con sé un criterio pratico per decidere se una particolare proposizione di tale linguaggio sia vera o falsa (e invero questo non è affatto il suo scopo). Si consideri per esempio la seguente proposizione nel linguaggio della geometria elementare: « le tre bisettrici di un triangolo passano per uno stesso punto ». Se ci interessa sapere se questa proposizione è vera e ci rifacciamo alla definizione di verità per scoprirlo, siamo destinati ad avere una delusione. L'unica informazione che ricaviamo è che la proposizione è vera se le tre bisettrici di un triangolo si incontrano sempre in un punto, e falsa in caso contrario; solo un'indagine di natura geometrica ci permetterà di decidere come stanno le cose in realtà. Considerazioni analoghe valgono per proposizioni tratte dal dominio di altre scienze particolari: è compito della scienza stessa scoprire se una tale proposizione è vera o falsa, e non della logica o della teoria della verità.

Alcuni filosofi ed epistemologi sono propensi a rifiutare ogni definizione che non fornisca un criterio per decidere, per ciascun oggetto particolare assegnato, se cada o no sotto il concetto definito. Nella metodologia delle scienze empiriche tale tendenza è rappresentata dall'operazionismo e è condivisa anche da quei filosofi della matematica che appartengono alla scuola costruttivista; in ambedue i casi, tuttavia, solo una piccola minoranza dei pensatori sono di questa opinione. Non è mai stato fatto un tentativo organico per condurre a termine, in pratica, il programma di sviluppare una scienza senza l'uso di definizioni indesiderabili. È chiaro che seguendo un programma del genere molta della matematica contemporanea scomparirebbe e resterebbero gravemente mutilati anche

gli aspetti teorici della fisica, della chimica, della biologia e delle altre scienze empiriche. Nella definizione di concetti come atomo, gene, eccetera, cosí come nella maggior parte delle definizioni matematiche, non è implicito alcun criterio per decidere se un oggetto cade o no sotto il termine definito.

Proprio per la mancanza di un tale criterio di decisione nella definizione di verità, mentre la ricerca della verità è giustamente considerata l'essenza delle attività scientifiche, diventa un problema importante trovare almeno dei criteri parziali di verità e sviluppare procedimenti che ci permettano di asserire o negare la verità (o per lo meno la probabilità della verità) del maggior numero possibile di proposizioni. E, in realtà, esistono procedimenti di questo tipo, alcuni usati esclusivamente nelle scienze empiriche, altri prevalentemente nelle scienze deduttive. Il concetto di dimostrazione – il secondo preso in considerazione nel presente lavoro – si riferisce appunto a un procedimento per verificare la verità delle proposizioni, che viene impiegato prevalentemente nelle scienze deduttive; esso è un elemento essenziale di ciò che è noto come metodo assiomatico, il solo metodo ormai usato per sviluppare le discipline matematiche.

Il metodo assiomatico e, all'interno di esso, il concetto di dimostrazione, sono frutto di un lungo sviluppo storico; per capire l'odierno concetto di dimostrazione è forse essenziale una conoscenza, sia pure rudimentale, di tale sviluppo.

In origine, una disciplina matematica era considerata come un aggregato di proposizioni, relative a una certa classe di oggetti o fenomeni, che venivano formulate a partire da certi termini iniziali e che erano considerate vere. Tale aggregato di proposizioni non aveva alcuna struttura interna; una proposizione veniva accettata come vera o perché intuitivamente evidente o perché era dimostrata a partire da alcune proposizioni intuitivamente evidenti, risultando quindi una conseguenza di queste ultime sulla base di un ragionamento intuitivamente sicuro. Il criterio dell'evidenza intuitiva e dell'intuitiva certezza dei ragionamenti veniva applicato senza restrizioni; ogni proposizione riconosciuta per vera sulla base di tale criterio veniva automaticamente inclusa nella disciplina. La descrizione testé fornita sembra adeguata, per esempio, alla *scienza* della geometria com'era nota agli antichi Egizi e ai Greci nel suo stadio preeuclideo.

Presto ci si accorse, però, che il criterio dell'evidenza intuitiva è lungi dall'essere infallibile, non ha alcun carattere oggettivo e spesso conduce a seri errori. Tutto lo sviluppo successivo del metodo assiomatico può considerarsi come espressione della tendenza a limitare l'uso dell'evidenza intuitiva.

Tale tendenza si rivelò la prima volta nello sforzo di dimostrare il maggior numero possibile di proposizioni e quindi di limitare il piú possibile il numero delle proposizioni accettate per vere sulla sola base dell'evidenza. L'ideale, da questo punto di vista, sarebbe quello di dimostrare ogni proposizione che vada accettata per vera, ma per ovvie ragioni un tale ideale non può essere raggiunto. Infatti, una proposizione si dimostra a partire da altre, queste a partire da altre ancora e così via: se vogliamo evitare sia un circolo vizioso sia un regresso all'infinito, siamo costretti a interrompere la trafila in qualche punto. Come compromesso fra l'ideale irraggiungibile e le possibilità effettive, emersero due principi che furono successivamente usati per costruire discipline matematiche. Per il primo di questi principi ogni teoria comincia con un piccolo elenco di proposizioni che appaiono intuitivamente evidenti e che sono accettate per vere senza ulteriori giustificazioni. Secondo l'altro principio, nessun'altra proposizione viene accettata per vera nella disciplina se non si riesce a dimostrarla col solo ausilio degli assiomi e delle proposizioni dimostrate in precedenza.

Tutte le proposizioni che si possono considerare vere grazie a questi due principi vengono chiamate teoremi o proposizioni dimostrabili della data teoria. Due principi analoghi regolano l'uso e la costruzione dei termini della teoria: per il primo, si fa all'inizio un elenco di quei termini, intelligibili direttamente, che si usano nell'enunciato e nella dimostrazione dei teoremi, senza spiegarne il significato: essi vengono detti termini primitivi o termini non definiti; per il secondo principio si conviene di non usare alcun altro termine il cui significato non possa spiegarsi mediante esplicita definizione a partire dai termini primitivi e da quelli definiti precedentemente. Questi quattro principi sono le pietre miliari del metodo assiomatico, e le teorie sviluppate in accordo con essi vengono chiamate teorie assiomatiche.

È ben noto che il metodo assiomatico fu applicato allo sviluppo della geometria verso il 300 a.C. negli *Elementi* di Euclide. Da allora esso fu usato per oltre 2000 anni praticamente senza alcun cambiamento dei suoi principi fondamentali (i quali, per inciso, non furono nemmeno esplicitamente formulati per lungo tempo) né dell'atteggiamento di fondo nell'affrontare l'argomento. Nel XIX e nel XX secolo, però, il metodo assiomatico subí una profonda evoluzione, la quale, per quanto riguarda il concetto di dimostrazione, è particolarmente significativa per la nostra trattazione.

Fin verso la fine del XIX secolo il concetto di dimostrazione rivestí un carattere prevalentemente psicologico: una dimostrazione era un'attività intellettuale volta a convincere se stesso e gli altri della verità di una data proposizione; piú precisamente, nello sviluppare una teoria matematica, le dimostrazioni venivano usate per convincere se stessi e gli altri che una data proposizione doveva essere accettata per vera una volta che fossero state prese per vere certe proposizioni precedenti. Per i ragionamenti usati nelle dimostrazioni non veniva posta alcuna condizione, salvo quella di essere intuitivamente convincenti. A un certo momento, però, cominciò a farsi sentire il bisogno di sottoporre il concetto di dimostrazione a un'analisi piú approfondita, con l'eventuale risultato di dover limitare il ricorso all'evidenza intuitiva, sia pur rimanendo nel vecchio schema. La cosa fu dovuta, probabilmente, a certi particolari sviluppi della matematica, soprattutto alla scoperta delle geometrie non euclidee. La analisi fu condotta dai logici, a partire dal logico tedesco Gottlob Frege; si giunse cosí a introdurre un nuovo concetto, quello di *dimostrazione formale*, che rappresentò un sostituto adeguato del vecchio concetto psicologico e anche un essenziale miglioramento.

Il primo passo per corredare una teoria matematica del concetto di dimostrazione formale è la formalizzazione del suo linguaggio, nel senso spiegato sopra in relazione alla definizione di verità; si danno cosí delle regole sintattiche formali che permettano, in particolare, di distinguere, a partire solo dalla forma esteriore delle espressioni, fra le espressioni stesse quelle che sono proposizioni. Il passo successivo consiste nel formulare alcune regole di natura diversa, le cosiddette regole di deduzione o di inferenza. In virtú di queste regole una proposizione viene considerata direttamente deducibile da certe proposizioni date se, in generale, la sua forma è collegata alla forma delle altre in una maniera assegnata. Il numero delle regole di inferenza è piccolo, e il loro contenuto semplice; proprio come per il caso delle regole sintattiche, esse hanno un carattere formale, cioè si riferiscono esclusivamente alla forma esteriore delle proposizioni a cui si applicano. Intuitivamente, tutte le regole di deduzione sono chiaramente infallibili, nel senso che risulta necessariamente vera ogni proposizione che sia direttamente derivabile, in virtú di una di tali regole, da proposizioni vere; l'infallibilità delle regole di deduzione può essere stabilita, in pratica, sulla base di una definizione adeguata di verità. Il piú noto e importante esempio di regola di inferenza è la regola di separazione, nota anche come *modus ponens*. In virtú di questa regola (che in alcune teorie è l'unica regola di inferenza) una proposizione « q » è derivabile direttamente da due date proposizioni se una di esse è la proposizione condizionale « se p, allora q », mentre l'altra è « p »; qui « p » e « q » sono, come al solito, abbreviazioni di due qualsivogliano proposizioni del nostro linguaggio formalizzato. Siamo ora in grado di spiegare in cosa consiste una dimostrazione formale di una data proposizione. In un primo momento si applicano le regole di inferenza agli assiomi e si ottengono nuove proposizioni che sono derivabili direttamente dagli assiomi, poi si applicano le solite regole al nuovo insieme di proposizioni cosí ottenuto e si ottengono ancora altre proposizioni, e cosí via. Di una proposizione che sia stata ottenuta per questa via dopo un numero finito di passi si dice che è stata dimostrata formalmente. Quanto precede si può esprimere in modo piú preciso come segue: una dimostrazione formale di una data proposizione consiste nel costruire una successione finita di proposizioni tale che (1) la prima proposizione della successione è un assioma, (2) ciascuna delle proposizioni seguenti è un assioma oppure è derivabile direttamente, mediante una regola di inferenza, da alcune delle proposizioni che la precedono nella successione, e (3) l'ultima proposizione della successione è quella che si voleva dimostrare. Forzando un po' l'uso della parola « dimostrazione », si può dire addirittura che una dimostrazione formale è proprio una successione finita di proposizioni con le proprietà sopra elencate.

Si chiama teoria formale una teoria assiomatica il cui linguaggio sia stato formalizzato, e per la quale si sia data una definizione di dimostrazione formale. Conveniamo di accettare come uniche dimostrazioni in una teoria formale le sue dimostrazioni formali; quindi le uniche proposizioni accettabili come teoremi saranno quelle che compaiono nell'elenco degli assiomi e quelle per cui possa trovarsi una dimostrazione formale. Il metodo che consiste nel presentare una teoria formalizzata in ognuna delle fasi del suo sviluppo è, in linea di principio, molto elementare. Prima si elencano gli assiomi, poi tutti i teoremi noti, in un ordine tale che ciascuna proposizione dell'elenco che non sia un assioma possa venire riconosciuta direttamente come teorema semplicemente confrontando la sua forma con quella delle proposizioni che la precedono nell'elenco; viene cosí escluso ogni ricorso a complicate vie di ragionare e di convincere. (Naturalmente non mi riferisco qui ai processi psicologici mediante i quali i teoremi sono stati scoperti nella realtà.) Il ricorso all'evidenza intuitiva viene cosí a essere notevolmente limitato; non che si siano completamente eliminati i dubbi relativi alla verità dei teoremi, ma ci siamo almeno ridotti solo agli eventuali dubbi sulla verità delle poche proposizioni elencate come assiomi e sulla infallibilità delle poche e semplici regole di deduzione. Anche per quanto riguarda l'introduzione di nuovi termini nel linguaggio, si potrebbe usare un metodo formale, fornendo certe regole formali per le definizioni.

È ormai noto che tutte le teorie matematiche esistenti possono venire presentate come teorie formali, e che si possono trovare delle dimostrazioni formali per quei teoremi matematici, per profondi e complicati che siano, che in origine furono stabiliti con ragionamenti intuitivi.

Le relazioni fra verità e dimostrazione

È stato senza dubbio un grande progresso della logica moderna l'aver sostituito al vecchio concetto psicologico di dimostrazione, che non poteva certo essere reso chiaro e rigoroso, un nuovo concetto che avesse sia la dote della semplicità sia un carattere puramente formale. Tuttavia nel trionfo del metodo formale era già insito il germe di un futuro regresso: come ora vedremo, proprio la semplicità del nuovo concetto era il suo tallone di Achille.

Per dare un giudizio di valore sul concetto di dimostrazione formale, dobbiamo chiarirne i rapporti col concetto di verità. In fondo, la dimostrazione formale, come del resto la vecchia dimostrazione intuitiva, è un procedimento che mira ad acquisire nuove proposizioni vere. Un tale procedimento si considererà perciò adeguato solo se tutte le proposizioni che possono acquisirsi con il suo ausilio risulteranno vere e, viceversa, tutte le proposizioni vere saranno ottenibili per suo mezzo. Ne sorge, in modo spontaneo, il problema se la dimostrazione formale sia in effetti un procedimento adeguato per acquisire la verità; in altre parole, se l'insieme delle proposizioni dimostrabili (formalmente) coincida con l'insieme delle proposizioni vere.

Studieremo questo problema, per semplicità, relativamente a una particolare teoria matematica molto elementare, cioè all'aritmetica dei numeri naturali (teoria elementare dei numeri). Supponiamo che la teoria in questione venga presentata come teoria formale. Il suo vocabolario è molto povero e consta di variabili, quali « m », « n », « p »,... che rappresentano numeri naturali; dei numerali « 0 », « 1 », « 2 »,... che denotano numeri particolari; di simboli che denotano alcune relazioni e operazioni familiari sui numeri, quali « = », « < », « + », « − »; e infine di certi termini logici, e precisamente i connettivi proposizionali (« e », « oppure », « se... allora », « non ») e i quantificatori (espressioni della forma « per ogni numero m » e « per qualche numero m »). Le regole sintattiche e le regole di inferenza sono semplici. Nel seguito, parlando di proposizioni, ci riferiremo costantemente alle proposizioni del linguaggio formalizzato dell'aritmetica.

Da quanto esposto nel primo paragrafo sulla verità, risulta che si può prendere il linguaggio formalizzato dall'aritmetica come linguaggio oggetto e costruire un opportuno metalinguaggio nel quale si possa formulare una definizione adeguata di verità. Risulta comodo, in tale contesto, dire che si è cosí definito l'insieme delle proposizioni vere; la definizione di verità esprime infatti che una certa condizione formulata nel metalinguaggio è soddisfatta da tutti e soli gli elementi di questo insieme, cioè da tutte e sole le proposizioni vere. Ancor piú facilmente si può definire, nel metalinguaggio, l'insieme delle proposizioni dimostrabili, attenendosi alla spiegazione del concetto di dimostrazione formale data nel secondo paragrafo. A rigore, sia la definizione di verità sia quella di dimostrabilità appartengono a una nuova teoria formulata nel metalinguaggio e costruita col preciso scopo di studiare l'aritmetica formalizzata e il suo linguaggio. La nuova teoria è chiamata metateoria o, nel caso in esame, metaaritmetica. Non approfondiremo qui il modo in cui la metateoria, con i suoi assiomi, termini primitivi eccetera, viene costruita; ci limiteremo a far notare che essa rappresenta il quadro nel quale si formula e si risolve il problema del confronto fra l'insieme delle proposizioni dimostrabili e quello delle proposizioni vere.

La soluzione del problema risulta negativa, e qui daremo una rapida descrizione del metodo che ha permesso di dimostrarlo. L'idea principale è stret-

tamente connessa con quella usata dal logico contemporaneo americano (di origine austriaca) Kurt Gödel nella sua famosa pubblicazione sulla incompletezza dell'aritmetica.

Nel primo paragrafo abbiamo osservato che il metalinguaggio che ci permette di definire e studiare il concetto di verità deve essere ricco. Esso contiene tutto il linguaggio oggetto come sua parte e quindi si può parlare in esso dei numeri naturali, delle relazioni fra numeri naturali e cosí via. Esso contiene inoltre dei termini necessari per lo studio del linguaggio oggetto e delle sue componenti; di conseguenza si può parlare, nel metalinguaggio, delle espressioni, e in particolare delle proposizioni e cosí via. Nella metateoria si ha dunque la possibilità di studiare le proprietà di tali oggetti e stabilirne i mutui rapporti.

Facendo ricorso alla descrizione delle proposizioni fornita dalle regole sintattiche del linguaggio oggetto è facile, in particolare, disporre tutte le proposizioni in successione in ordine progressivo di complessità e numerarle successivamente. Si viene ad associare, cosí, un numero naturale a ciascuna proposizione, in modo tale che a proposizioni diverse vengano sempre associati numeri diversi; in altre parole, si stabilisce una corrispondenza biunivoca fra le proposizioni e i numeri. Questa a sua volta induce una corrispondenza biunivoca fra gli insiemi di proposizioni e gli insiemi di numeri, come pure fra le relazioni fra proposizioni e le relazioni fra numeri. In particolare, ci saranno dei numeri associati a proposizioni dimostrabili e altri associati a proposizioni vere; per brevità li chiameremo rispettivamente numeri dimostrabili* e numeri veri*. Il problema che ci interessa si riduce quindi al confronto fra l'insieme dei numeri dimostrabili* e quello dei numeri veri*.

Per mostrare che i due insiemi non coincidono, sarà ovviamente sufficiente indicare una proprietà di cui goda uno dei due insiemi e non l'altro. La proprietà che indicheremo noi potrà sembrare sorprendente, quasi un *deus ex machina*.

La semplicità intrinseca dei concetti di dimostrazione formale e di dimostrabilità formale rivestirà qui un ruolo fondamentale. Si è visto nel secondo paragrafo che il significato di questi concetti viene spiegato essenzialmente in termini di certe relazioni semplici fra proposizioni assegnate da poche regole di inferenza, come per esempio la regola del *modus ponens*. Le corrispondenti relazioni fra i numeri delle proposizioni sono altrettanto semplici; esse possono essere descritte mediante le operazioni e relazioni aritmetiche piú semplici, quali l'addizione, la moltiplicazione e l'uguaglianza, cioè mediante termini che compaiono esplicitamente nella teoria aritmetica. Di conseguenza, anche l'insieme dei numeri dimostrabili* può essere descritto mediante tali termini. Si può riassumere quanto precede dicendo che la definizione di dimostrabilità è stata tradotta dal metalinguaggio nel linguaggio oggetto.

D'altro lato, l'esposizione che abbiamo fatto relativamente al concetto di verità nei linguaggi correnti suggerisce la congettura che un'analoga traduzione non sia possibile per la definizione di verità, altrimenti il linguaggio oggetto risulterebbe in un certo senso semanticamente universale col risultato che potrebbe ricomparire l'antinomia del mentitore. Convalideremo tale congettura mostrando che effettivamente sarebbe possibile riformulare in questo linguaggio l'antinomia del mentitore qualora l'insieme dei numeri veri* fosse definibile nel linguaggio dell'aritmetica. Tuttavia, avendo ora a che fare con un linguaggio formalizzato limitato, l'antinomia assumerebbe qui una forma piú involuta e complicata; in particolare, nella nuova formulazione non comparirebbe alcuna espressione il cui significato empirico fosse del tipo « la proposizione stampata nel punto tal dei tali », mentre nella formulazione iniziale dell'antinomia è stata proprio un'espressione di questo tipo a rivestire un ruolo fondamentale. In questo articolo non ci addentreremo però ulteriormente nei dettagli tecnici della questione.

In conclusione, l'insieme dei numeri dimostrabili* non coincide con quello dei numeri veri*, giacché mentre l'uno è definibile nel linguaggio dell'aritmetica, l'altro non lo è. Ne segue che sono distinti anche gli insiemi delle proposizioni dimostrabili e vere. Ricorrendo alla definizione di verità, si verifica d'altronde che tutti gli assiomi dell'aritmetica sono veri e tutte le regole di inferenza sono infallibili, quindi tutte le proposizioni dimostrabili sono vere e perciò non vale il viceversa. Abbiamo cosí raggiunto la conclusione che: esistono delle proposizioni vere formulate nel linguaggio dell'aritmetica le quali non possono essere dimostrate a partire dagli assiomi e dalle regole di inferenza accettate in aritmetica.

Si potrebbe pensare che la conclusione precedente dipenda in modo essenziale dalla scelta degli assiomi e delle regole di inferenza particolari scelte per la nostra teoria aritmetica: arricchendo opportunamente la teoria con l'aggiunta di nuovi assiomi e nuove regole di inferenza, si potrebbe forse giungere a un risultato diverso. Una piú attenta analisi mostra, invece, che il precedente ragionamento dipende ben poco dalle proprietà specifiche della teoria esaminata, essendo possibile estenderlo alla maggior parte delle altre teorie formali. Supposto che in una teoria sia contenuta l'aritmetica dei numeri naturali, o almeno che questa si possa ricostruire all'interno di quella, allora è possibile ripetere la parte essenziale del precedente ragionamento in una forma praticamente immutata, giungendo cosí ancora alla conclusione che l'insieme delle proposizioni dimostrabili è diverso da quello delle proposizioni vere. Se inoltre (e questo è il caso piú frequente) tutti gli assiomi della teoria sono veri e tutte le regole di inferenza infallibili, si conclude ancora che esistono nella teoria delle proposizioni vere che non sono dimostrabili. Se si escludono alcune teorie parziali con limitati mezzi espressivi, in genere l'ipotesi precedente sulle relazioni fra una teoria e l'aritmetica è soddisfatta, perciò la nostra conclusione ha un carattere quasi universale. Per quanto riguarda quelle teorie povere che non comprendono l'aritmetica dei numeri naturali, può accadere che il relativo linguaggio non abbia mezzi di espressione sufficienti a definire il concetto di dimostrabilità, e talvolta le proposizioni dimostrabili coincidano proprio con quelle vere. I piú noti esempi, e forse i piú importanti, di teorie per le quali i due concetti coincidono sono la geometria elementare e l'algebra elementare dei numeri reali.

La parte predominante sostenuta in tutto il ragionamento dall'antinomia del mentitore chiarisce in modo interessante le precedenti osservazioni sul ruolo delle antinomie nella storia del pensiero umano. All'inizio l'antinomia del mentitore si è presentata nella nostra trattazione come una specie di forza del male con un enorme potere di distruzione, costringendoci ad abbandonare ogni tentativo di chiarire il concetto di verità per i linguaggi naturali. Abbiamo dovuto limitare i nostri sforzi ai linguaggi formalizzati del discorso scientifico e, come salvaguardia contro la possibilità che l'antinomia rifacesse la sua comparsa, abbiamo dovuto complicare considerevolmente la indagine con la distinzione fra linguaggio e metalinguaggio.

In un secondo momento, però, nella nuova sistemazione, siamo riusciti a domare l'energia distruttiva incanalandola verso scopi pacifici e costruttivi; l'antinomia non si è riaffacciata, e l'idea di fondo in essa contenuta è stata anzi usata per stabilire un significativo risultato metalogico con notevoli e profonde conseguenze.

Il fatto che le implicazioni filosofiche del nostro risultato siano di carattere sostanzialmente negativo non ne diminuisce affatto l'importanza. Il risultato mostra, invero, che in nessun campo della matematica il concetto di dimostrabilità è un sostituto perfetto di quello di verità; la credenza che la dimostrazione formale possa costituire uno strumento adeguato per stabilire la verità di tutti gli enunciati matematici si è rivelata infondata, e al trionfo iniziale dei metodi formali ha fatto seguito un notevole regresso.

Qualunque aggiunta si facesse ora alla precedente esposizione non potrebbe che diminuirne l'effetto. Il concetto di verità per le teorie formalizzate può ora introdursi in modo preciso mediante una definizione adeguata e può quindi venire usato senza riserve né limitazioni nelle trattazioni metalogiche, giacché è addirittura diventato un concetto metalogico fondamentale che entra in problemi e risultati fra i più importanti. D'altra parte, neanche il concetto di dimostrazione ha perduto la sua importanza; la dimostrazione resta l'unico metodo usato per verificare la verità delle proposizioni nell'ambito di una teoria matematica particolare. Tuttavia, abbiamo ora acquisito la consapevolezza che esistono delle proposizioni, formulate nel linguaggio della teoria, vere ma non dimostrabili, e non possiamo trascurare l'eventualità che fra queste se ne trovi qualcuna di quelle interessanti che si desidererebbe dimostrare. In alcune situazioni può essere dunque desiderabile indagare sulla possibilità di ampliare l'insieme delle proposizioni dimostrabili; allo scopo si arricchisce la data teoria aggiungendo nuove proposizioni al suo sistema di assiomi o dotandola di nuove regole di inferenza. In tale processo serve da guida il concetto di verità, giacché vogliamo evitare di aggiungere assiomi che si sospettino falsi o regole di inferenza che, applicate a proposizioni vere, diano luogo a proposizioni false. L'operazione di estendere una teoria può naturalmente essere ripetuta quante volte si vuole; ne risulta che il concetto di proposizione vera funziona come limite ideale che non potrà mai essere raggiunto ma che si tenta di approssimare gradualmente mediante successivi ampliamenti dell'insieme delle proposizioni dimostrabili. Non c'è alcun conflitto fra il concetto di verità e quello di dimostrazione nello sviluppo della matematica; i due concetti non sono in guerra fra loro, ma vivono in coesistenza pacifica.

Vita sulla pelle umana

Le pelle è un ecosistema, con flora e fauna microscopiche e con zone ecologiche diverse: il deserto dell'avambraccio, i freddi boschi del cuoio capelluto e la foresta tropicale delle ascelle

di Mary J. Marples

Chi si sentisse dire che ha la pelle coperta di germi, rimarrebbe un po' a disagio e risponderebbe che fa la doccia ogni mattina. La situazione non migliorerebbe di molto se gli si dicesse che la doccia o il bagno, portando via un po' di pelle, fanno affiorare i microrganismi presenti nelle fessure e che quindi la popolazione totale dei germi sulla pelle aumenta.

Riguardata così, cioè come un mondo densamente popolato, la pelle è di estremo interesse: diventa per lo studioso una specie di terreno con caratteristiche favorevoli o dannose per gli organismi che ospita. L'ambiente e le popolazioni di germi che vi vivono formano un ecosistema, un mondo a sé, i cui componenti, viventi e non, si mantengono in perfetto equilibrio interagendo tutti tra loro.

A rigore, non vi sarebbe che un unico ecosistema, quello di tutta la Terra; ma in ecologia (la scienza che studia i rapporti reciproci tra gli organismi e il loro ambiente) certe aree localizzate, come un deserto, una foresta, uno stagno o un fiume, vengono considerate unità indipendenti. Naturalmente la pelle è diversa dal substrato inorganico degli ecosistemi terrestri: mentre la crosta terrestre è composta di minerali solidi, la superficie non vivente della pelle viene costantemente rinnovata dal basso e è provvista di secrezioni ghiandolari. Nondimeno la cute possiede caratteristiche uniche che la qualificano come un ecosistema. Enorme è la quantità di informazioni che si sono venute accumulando relativamente alla sua struttura e alle sue funzioni; in effetti le caratteristiche della pelle umana sono probabilmente meglio note di quelle di qualsiasi altra zona abitata della natura. Inoltre la fauna e la flora cutanee sono facilmente accessibili. Il prelievo ripetuto conferma che non si hanno cambiamenti permanenti nella composizione della popolazione, e la maggior parte delle specie batteriche cutanee può essere normalmente coltivata in laboratorio.

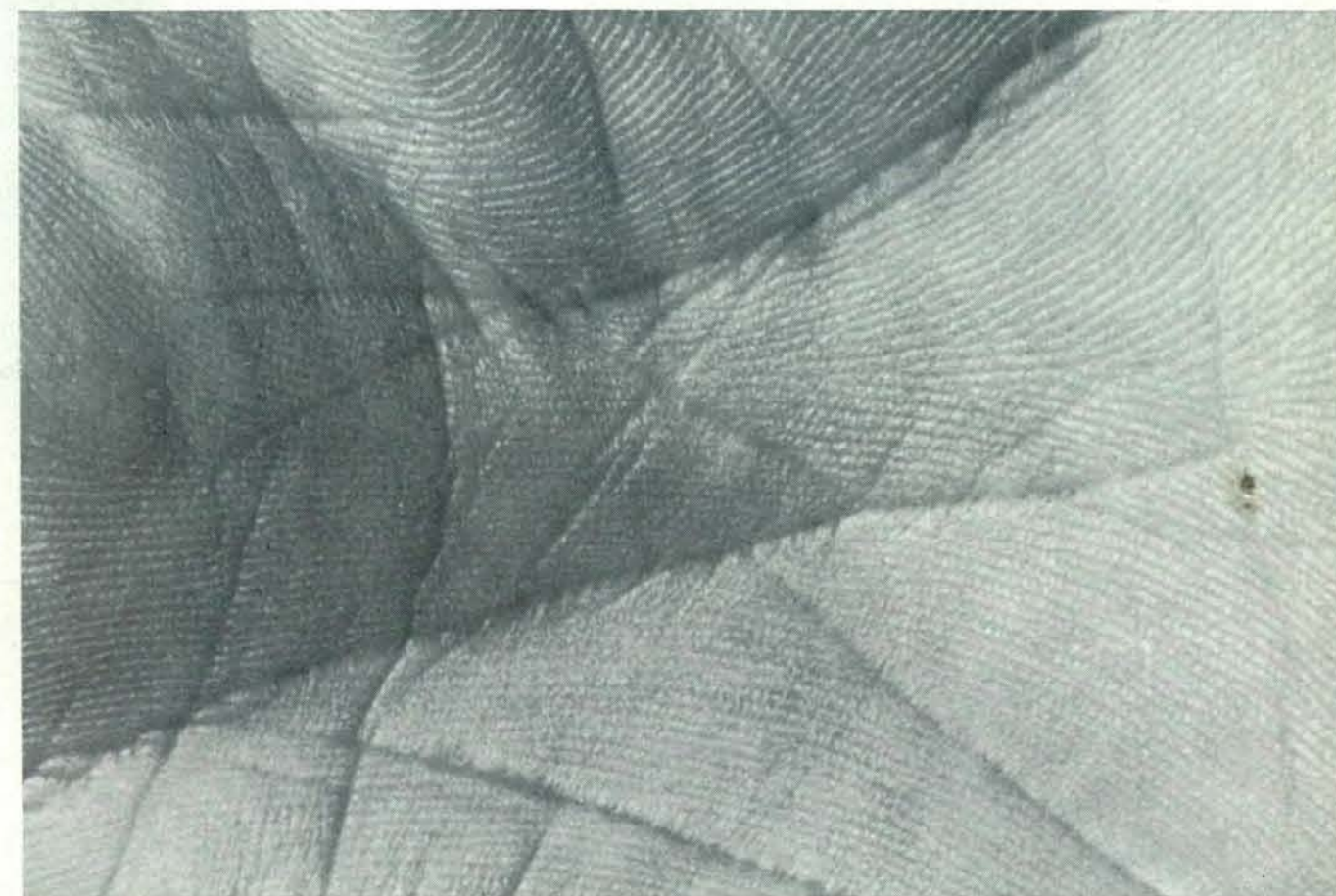
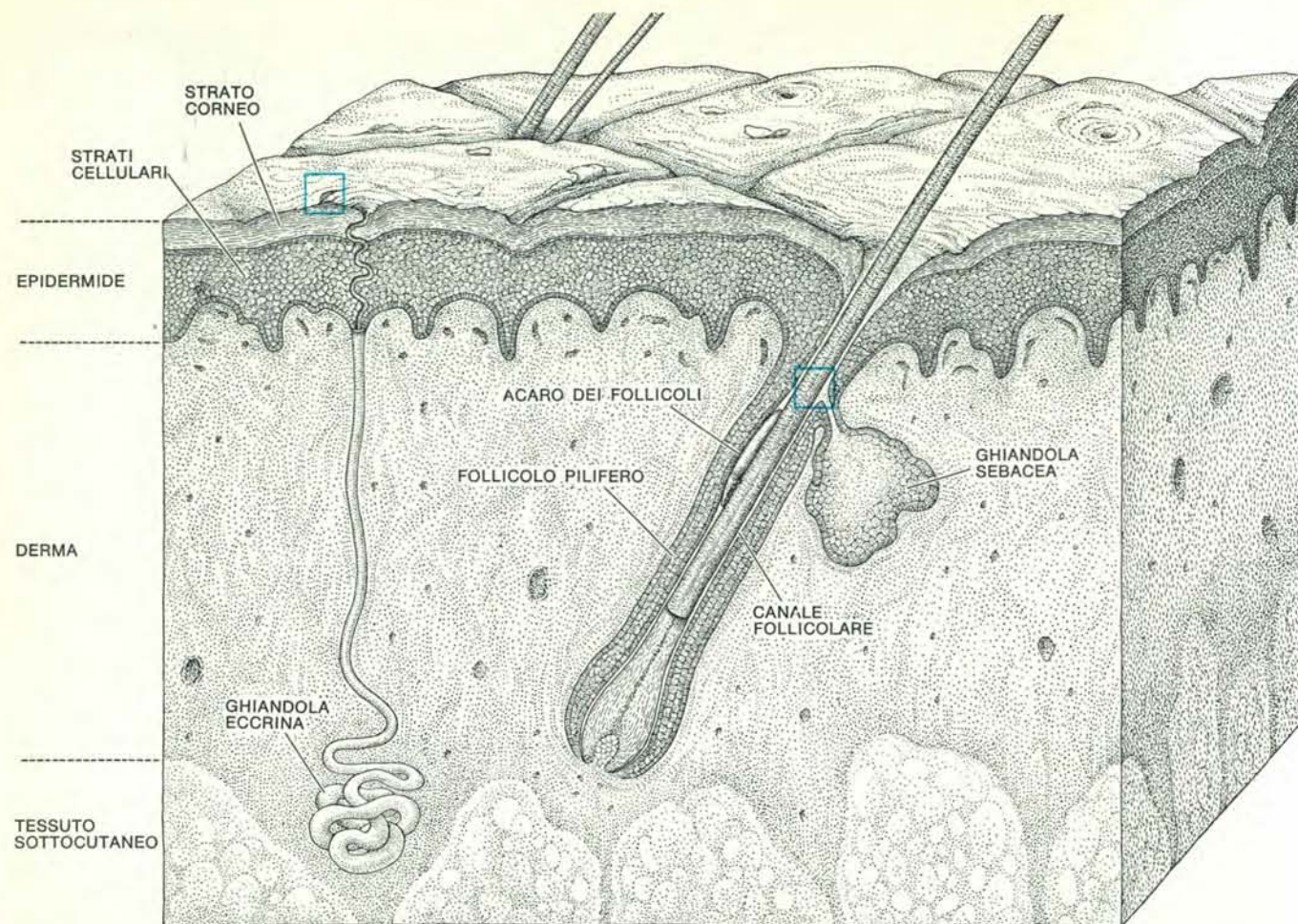
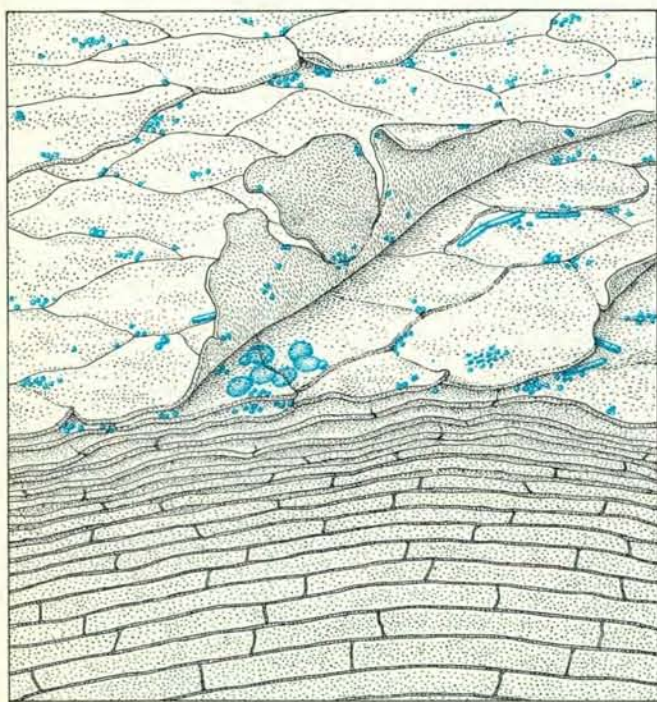
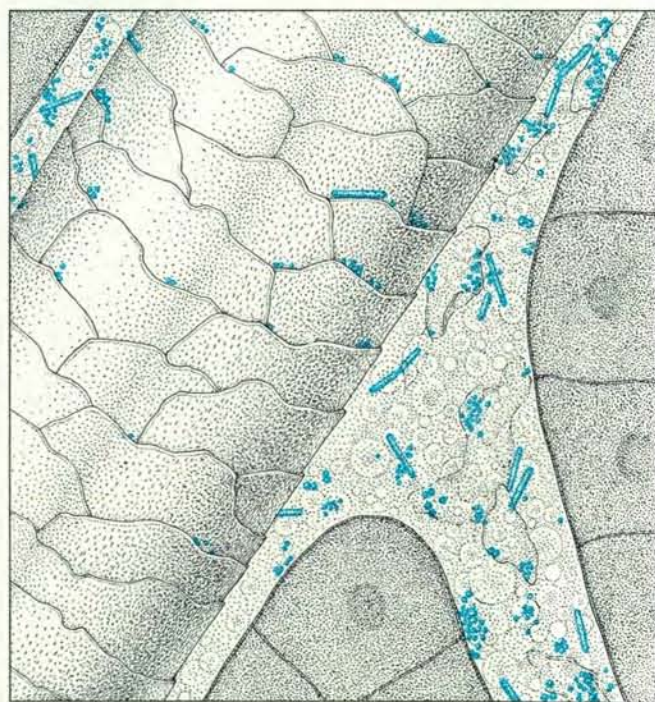
Nonostante questi evidenti vantaggi, le ricerche di ecologia cutanea sono state sporadiche e si sono orientate soprattutto sulle specie che provocano malattie. Solo di recente sono stati intrapresi studi sugli organismi naturali della cute, sui microbi innocui, o addirittura benefici, che vivono in gran numero sulla pelle. Alcuni di questi organismi sono potenzialmente patogeni: benché innocui se rimangono sulla superficie della pelle, possono essere causa di malattie se penetrano negli strati cutanei più profondi. Così lo studio dell'ecologia cutanea è essenziale per il controllo delle infezioni e delle ferite della pelle e può anche aiutare a risolvere problemi che la classica ecologia non è riuscita a risolvere. In quest'articolo esporrò quanto si sa sul mondo naturale della pelle, descrivendo come esso sia fatto, chi ci vive, e cosa succede quando arrivano nuovi microrganismi.

La superficie della pelle è un ambiente decisamente instabile per gli organismi che vi abitano. Lo strato cutaneo più superficiale, quello corneo, è formato da squame piatte, simili a quelle dei pesci, costituite da cheratina, una proteina fibrosa. Le squame cadono e vengono continuamente sostituite dal basso da parte delle cellule epidermiche che muoiono nel processo di formazione della cheratina. Dal punto di vista di un microrganismo che vive sulla pelle, le squame sono enormi ammassi piatti di materiale inerte, che improvvisamente si curvano e si staccano, trascinando con sé ogni organismo che vi si trovi sopra.

La superficie ineguale del mondo della pelle è perforata, a intervalli, da orifici di due tipi. Un primo tipo è costituito dal condotto delle ghiandole sudoripare eccrine, una fonte da cui stilla una soluzione debolmente salina, contenente piccole quantità di sostanze azotate e di altre sostanze nutritizie. Il flusso dalle ghiandole è variabile e la soluzione evapora, cosicché, in un certo senso, le condizioni ricordano un po' quelle di una pozzanghera in riva al mare, con le sue frequenti variazioni di livello e di salinità dell'acqua.

L'altro tipo di apertura della cute è il follicolo pilifero, un'infossatura cilindrica della pelle, da cui fuoriesce il pelo, un grosso « tronco d'albero » di dura cheratina. Dal follicolo essuda il sebo, una secrezione complessa contenente quantità elevate i lipidi, o sostanze grasse, e prodotta dalle ghiandole sebacee: il sebo si mescola col sudore, cioè col prodotto delle ghiandole sudoripare, e si diffonde sulla superficie epidermica vicina al follicolo pilifero. Ghiandole sebacee e follicoli piliferi non sono distribuiti uniformemente su tutto il corpo, ma variano per dimensioni e densità. Queste variazioni, insieme con altri fattori, conferiscono caratteri speciali a certe zone della pelle. Per esempio, l'ascella è dotata di grossi peli che ricevono le secrezioni da alcune strutture specializzate, le ghiandole sudoripare apocrine; il condotto auricolare esterno è provvisto di ghiandole che producono cerume, mentre il palmo delle mani e la pianta dei piedi hanno moltissime ghiandole sudoripare, mentre non hanno invece follicoli piliferi.

Le secrezioni ghiandolari e i sottoprodotti del processo di formazione della cheratina forniscono aminoacidi liberi, elementi di nutrizione per gli abitanti della pelle. Carboidrati pron-

La superficie di una prateria arida, un tipico ecosistema della superficie terrestre, in una fotografia aerea di una zona del Texas nord-occidentale. Un aspetto particolare di questo terreno è dato dalle vallate dei fiumi, dove la vegetazione è più ricca.

La superficie della pelle umana in una foto ingrandita del palmo della mano che, con la pianta dei piedi, differisce da tutte le altre zone della pelle per non avere follicoli piliferi. La popolazione di microrganismi è quindi necessariamente diversa.

L'habitat dei microrganismi normali è visibile in questa sezione schematica della pelle. Il *Demodex folliculorum*, l'acaro dei follicoli, è l'unico esemplare della fauna che si trova nella pelle sana, integra: appena visibile a occhio nudo, è 400 volte più grosso di un batterio medio. I quadratini in colore indicano le regioni cutanee che sono riprodotte a un ingrandimento molto maggiore nelle figure qui sotto. Il *Demodex folliculorum* normalmente risiede nella pelle della maggior parte degli adulti.

Lo strato superiore della pelle, il corneo, è formato da squame piatte a forma di scaglie, che si incurvano e si staccano. Sotto e intorno alle squame vi sono batteri e cellule fungine (*in colore*).

Il follicolo pilifero contiene parecchi batteri. Il disegno in alto presenta un ingrandimento di 50 diametri; in questo e nell'altro disegno a sinistra la pelle è ingrandita circa 1000 volte.

tamente utilizzabili e certe vitamine sembrano essere meno abbondanti, ma non vi sono prove dirette che la loro quantità sia insufficiente. Il clima della pelle è piacevolmente caldo ed è soggetto a variazioni di scarsa entità, salvo che ai piedi. Temperatura e apporto di liquidi sono favorevoli allo sviluppo dei microbi, quantunque per molte specie la leggera acidità della pelle sia uno svantaggio.

Vediamo ora le specie che si trovano sulla pelle sana. L'ecologo Eugene P. Odum ha diviso gli organismi che vivono in un ecosistema classico in tre gruppi principali: i produttori (soprattutto piante verdi che utilizzano l'energia solare per produrre sostanze organiche, partendo da sostanze inorganiche); i consumatori (animali che ricavano la loro energia dalle piante, in modo diretto o indiretto) e i decompositori (specialmente funghi e batteri che demoliscono piante e animali morti, facendo cosí ritornare al suolo gli elementi essenziali). In che quantità questi gruppi fisiologici sono rappresentati sulla cute? Non vi sono veri produttori, dato che il grande produttore è l'ospite. I microrganismi vivono, come Adamo ed Eva, in un paradiso dove tutte le loro necessità sono soddisfatte. Vi è un unico animale consumatore, il *Demodex folliculorum* o acaro dei follicoli. Questo microscopico essere vive, si accoppia e si riproduce sulle ciglia e sui follicoli piliferi delle pieghe del naso e del mento e di poche altre zone ristrette. Il *Demodex* abita sulla pelle della maggior parte degli uomini adulti. Altri organismi cutanei sono funghi, batteri e forse virus. Non è facile sistemare queste varie comunità nei gruppi metabolici di Odum, ma gli abitanti della pelle possono essere considerati sia consumatori che utilizzano le secrezioni cutanee, sia decompositori dei sottoprodotti della fabbricazione della cheratina.

Tra le specie che si trovano sulla pelle sana ve ne sono parecchie patogene, che vivono in un difficile equilibrio con l'ospite. Dopo lunghi periodi durante i quali restano innocue, una modificazione dell'ambiente cutaneo interno o esterno può alterare l'equilibrio: allora queste specie si moltiplicano e penetrano nello strato corneo. Un tipico esempio è dato dai funghi che provocano il « piede d'atleta »: spesso questi funghi risiedono sulla pianta e negli spazi tra le dita del piede, senza provocare le benché minime alterazioni della pelle. Un cambiamento dell'ambiente ospitante – un viaggio in zone torride, una temporanea mancanza di pulizia, modificazioni nello stato immunitario – porta alla proliferazione dei funghi e alla comparsa della malattia.

Solo pochi miceti sono presenti nella flora della pelle normale. Alcuni sono parzialmente o totalmente dipendenti dai lipidi e crescono con maggior abbondanza sul cuoio capelluto e sulle zone del volto piú ricche di sebo, come le pieghe del naso o l'orecchio. Forme meno frequenti di queste sono rappresentate da un gruppo di miceti che vivono sulla cute tra le dita dei piedi, ma sono forme di vita che non costituiscono mai un pericolo per la pelle.

Nella comunità dei microrganismi cutanei dominano i batteri. I tipi presenti possono essere divisi in Gram-positivi e Gram-negativi, secondo la reazione alla colorazione con il Gram. Questo semplice metodo di colorazione, che porta il nome del batteriologo danese Hans Christian Joachim Gram, è il piú usato in batteriologia, perché i due gruppi che esso distingue differiscono tra loro non solo nelle caratteristiche chimiche, ma anche nella fisiologia e nelle proprietà patogene. Sulla pelle sana predominano i batteri Gram-positivi, rappresentati da due gruppi: uno dei cocchi aerobi le cui cellule sono sferiche e che utilizzano l'ossigeno, e l'altro dei difteroidi (o bacilli), la cui forma a bastoncino varia secondo i singoli batteri. Quasi tutti i cocchi sono innocui, salvo che in circostanze particolarissime: una sola specie, lo *Staphylococcus aureus*, è causa di foruncoli, di favi e di altre infezioni piú gravi, tra cui quelle che colpiscono i neonati o che infettano le ferite operatorie.

Allo *Staphylococcus aureus* è stata dedicata in questi ultimi anni molta attenzione, soprattutto per la sua capacità di divenire resistente agli antibiotici. Residenza principale di questo microrganismo sono le narici; in molti bambini lo si è trovato anche sull'ombelico e sulla pelle dell'addome; negli adulti invade il perineo. Di norma non provoca alterazioni patologiche della cute.

I difteroidi possono essere divisi in tre gruppi ecologici. Il primo comprende la specie *Corynebacterium acnes*, il « bacillo dell'acne », che è anaerobio e vive nelle profondità del follicolo pilifero. Gli altri difteroidi sono aerobi e si dividono in due tipi, uno che ha bisogno di nutrimento lipidico e l'altro no.

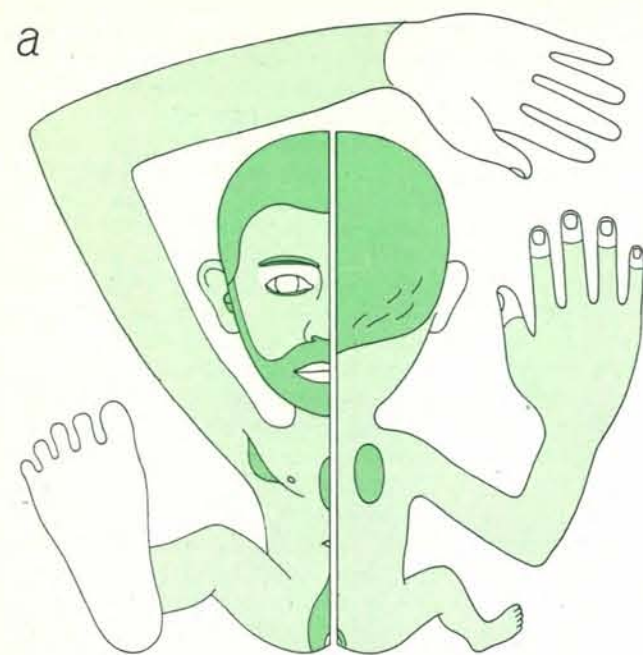
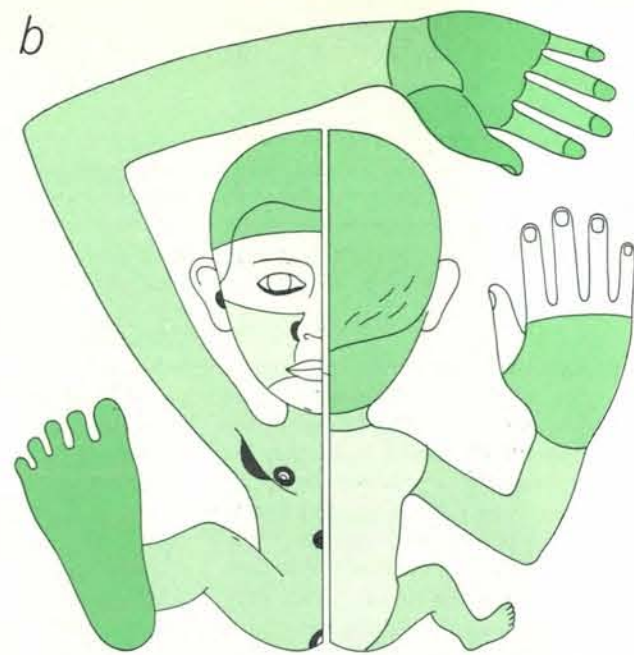
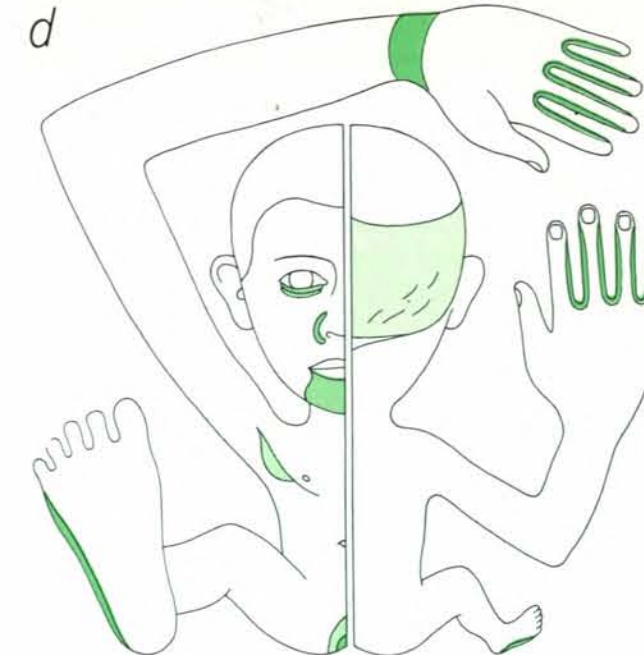
Sulla pelle della maggior parte delle persone si trovano anche ceppi di batteri Gram-negativi. Un gruppo, le *Mimeae*, che comprende organismi potenzialmente patogeni, sembra essere comune sui piedi dei bambini e degli adulti, mentre è raro nelle donne.

È impossibile dire fino a che punto sulla pelle sana vivono virus, perché è difficile accertarne la presenza. Poiché i virus sono parassiti di cellule viventi e sullo strato superiore della pelle non vi sono cellule vive, ogni virus cutaneo dovrebbe vivere negli strati piú profondi. D'altra parte, i virus che parassitano i batteri (i batteriofagi) sono presenti sulla pelle in numero significativo. Si sa per esempio che molti ceppi di *Staphylococcus aureus* sono lisogeni, cioè portano con sé un virus il cui materiale genetico è unito al proprio. Di recente Leopoldo F. Montes, del Medical Center dell'Università dell'Alabama, ha dimostrato che tutti gli stadi del ciclo vitale del batteriofago si compiono in un difteroide cutaneo. È probabile che i batteriofagi possano colpire anche molte altre specie di batteri cutanei.

Qual è la densità della popolazione della pelle dell'uomo? La determinazione del numero di soggetti di ogni tipo per unità di superficie o di volume è la maggiore preoccupazione dell'ecologo classico ed è forse l'aspetto meglio documentato dell'ecologia cutanea, almeno per quanto riguarda i batteri. Ma come succede per altri rami dell'ecologia, è difficile condurre osservazioni documentate e riproducibili, anche per il fatto che attualmente molti sono i metodi di esame.

Nonostante i diversi metodi di misurazione, sembra dimostrato che vi sono differenze significative tra la densità di popolazione batterica ospitata dalle diverse persone. Queste differenze vengono mantenute per considerevoli periodi di tempo, cosí che certe persone hanno conte batteriche alte e altre basse. Differenze possono essere dimostrate anche nel singolo individuo: tra il deserto scarsamente abitato dell'avambraccio, per esempio, e la foresta tropicale dell'ascella e i freddi boschi del cuoio capelluto. Si ritiene generalmente che la popolazione batterica piú fitta si trovi sul viso, sul collo, all'ascella e all'inguine; sul tronco e sugli arti superiori è molto piú sparsa. La comunità microbica presente sulla pianta dei piedi e tra le dita è densa e varia.

Una delle tecniche d'esame piú attendibili è stata messa a punto da ricercatori dell'università di Pennsylvania. In questo gruppo, Peter Williamson ha riferito che nell'uomo adulto l'ascella è l'area piú densamente abitata, con una popolazione media di 2,41 mi-

lioni di batteri per centimetro quadrato di epidermide. Anche il conteggio medio del cuoio capelluto e della fronte è elevato (rispettivamente 1,46 milioni e 200 000 per centimetro quadrato). Al contrario, i conteggi relativi alla schiena danno una media di soli 314 batteri per un centimetro quadrato, mentre quelli per l'avambraccio si dividono in due gruppi, uno con una media di 4500 e l'altro con soli 105 batteri per centimetro quadrato. Questi dati si riferiscono solo ai batteri aerobi: è stato provato che nelle zone cutanee ricche di ghiandole sebacee gli organismi anaerobi possono superare gli aerobi nel rapporto di dieci a uno.

Non si può stabilire facilmente se questi dati indicano che la pelle è popolata densamente in confronto ad altri habitat. La popolazione cutanea va confrontata con quella microbica di una piccola zona della Terra o con quella di organismi di dimensioni medie o più grandi? Kitty Paviour-Smith, della Oxford University ha studiato la popolazione di organismi animali diversi dai protozoi presente in un deserto salato della Nuova Zelanda, e ha trovato un numero massimo di 7,6 milioni di metazoi per metro quadrato. Il conteggio più basso ottenuto da Williamson (quello dell'avambraccio) è di 1,05 milioni di batteri per metro quadrato, per cui l'avambraccio ha una popolazione più rada di un deserto salato. D'altro canto, i dati della fronte e dell'ascella sono molto più elevati (rispettivamente 2 miliardi e 24,1 miliardi per metro quadrato). Sembra dunque che vi siano molti più batteri aerobi sulla distesa salata della pelle che metazoi in una distesa salata della Nuova Zelanda.

L'ecosistema terrestre più indicato per un confronto con la cute è probabilmente il comune terreno dei campi. Sia il terreno che la pelle mancano di organismi produttori e ricavano il loro materiale organico dall'esterno: il terreno dall'alto (sotto forma di materiale morto delle piante) e la pelle dal basso. Sia nell'uno sia nell'altra vi è un'ampia matrice non vivente che viene permeata da soluzioni, e gli organismi viventi in entrambi sono raggruppati intorno a strutture che raggiungono la superficie partendo dagli strati più profondi. Nel suolo le popolazioni di microrganismi più dense si trovano nella rizosfera, la zona che circonda le radici delle piante; la regione cutanea analoga è il follicolo pilifero.

Vi sono molti studi sul numero dei batteri e dei funghi presenti nel suolo: i dati vanno (a seconda del terreno) da un minimo di 10 milioni a un massimo di 10 miliardi di organismi per grammo. Vi sono pochi dati sui batteri per unità di peso della pelle, ma gli studiosi dell'università di Pennsylvania riportano una media di 530 000 batteri per milligrammo di squame della superficie cutanea. Ciò porta a una cifra di 530 milioni per grammo, dato compreso nei limiti di un suolo fertile. Sembra che almeno alcune aree della pelle umana siano tanto densamente popolate di microrganismi quanto il suolo della Terra.

Numerose ricerche sono state condotte per studiare come gli stafilococchi patogeni passino da un soggetto all'altro: queste ricerche, intraprese allo scopo di controllare le infezioni che si diffondono negli ospedali, hanno portato però alla luce dati importanti sul trasferimento di microrganismi della flora comune da una persona all'altra. L'acquisizione di una flora cutanea ha inizio molto presto: un neonato che viene alla luce con taglio cesareo non ha abitanti sulla cute, ma Imrich Sarkany del Royal Free Hospital di Londra ha dimostrato che la pelle di un bambino nato è normalmente portatrice di una popolazione sparsa di cocchi e di difteroidi derivanti dal canale di parto della madre. La comunità aumenta rapidamente subito dopo la nascita, sia direttamente per il contatto con gli adulti, sia indirettamente per trasmissione aerea.

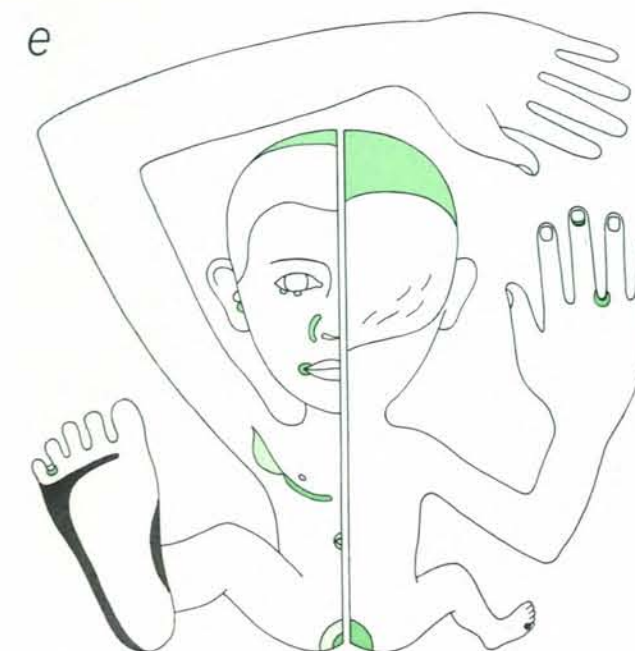
Questa flora ha caratteristiche particolari. Sulla pelle dei bambini vi è chiaramente una varietà di germi potenzialmente patogeni maggiore che su quella degli adulti; parecchie specie innocue, che non si trovano negli adulti, abitano

c

TEMPERATURA CUTANEA (GRADI CENTIGRADI)
MENO DI 32°
PIÙ DI 32°
PIÙ DI 34°

d

PIDOCCHIO DEL CAPO *(PEDICULUS)*
PIDOCCHIO DEL PUBE *(PHTHIRUS)*
ACARO DEI FOLLICOLI *(DEMODEX)*
ACARO DELLA SCABBIA *(SARCOPTES)*

e

STAPHYLOCOCCUS AUREUS
CORYNEBACTERIUM TENUIS
PITYROSPORUM OVALE
CANDIDA ALBICANS
TINEA PEDIS

f

POPOLAZIONI BATTERICHE
MOLTO DENSE
MODERATE O POCO DENSE
VARIABILI

Le figure distorte presentano habitat specializzati. La distribuzione dei peli (*a*) è quella di un adulto maschio. Le temperature della pelle (*c*) sono quelle di un adulto a riposo in un ambiente a circa 23 °C. Salvo che per l'acaro dei follicoli, la fauna (*d*) è patogena. In (*e*), il gruppo del *Corynebacterium tenuis* forma noduli sui capelli, il micete *Pityrosporum ovale* aumenta quando vi è forfora; il fungo *Candida albicans* provoca infezioni. In (*f*) sono indicati i batteri che utilizzano ossigeno.

Gli abitanti della pelle, che sono relativamente abbondanti negli strati superiori (cornei) dell'epidermide, diminuiscono di numero negli strati piú profondi. Streptococchi e funghi patogeni possono passare attraverso una breccia cutanea, fino a raggiungere il derma e i tessuti piú profondi dove possono provocare una infezione.

la pelle dei bambini piú grandi. Questo può essere dovuto, almeno in parte, al fatto che i bambini sono a contatto del suolo piú spesso che non gli adulti. Molti microrganismi presenti nel terreno, però, non possono sopravvivere in un habitat cutaneo e cosí la flora della pelle non rispecchia quella dell'ambiente circostante. Per la stessa ragione, la maggior parte degli organismi cutanei non si moltiplica nel terreno o nella polvere, anche se alcuni possono sopravvivere per un certo tempo. È per questo motivo che per il trasferimento di microrganismi cutanei è molto piú importante il contatto con altri uomini (e, fino ad un certo punto, con altri mammiferi) che non il contatto con un oggetto inanimato per quanto contaminato esso possa essere.

Si può pensare che in un adulto, stabilitasi la caratteristica comunità cutanea, non ci debbano essere ulteriori scambi di abitanti tra le persone. A questo punto la nostra analogia di un uomo visto come un mondo circoscritto ha termine. Nell'uomo, se il quadro dello stafilococco può essere considerato come un modello, vi è un continuo passaggio di microrganismi da un portatore all'altro, anche quando vengono prese rigorose misure preventive.

R.R. Davies e W.C. Noble, del St. John's Hospital per le Malattie della Pelle di Londra, hanno dimostrato che gli stafilococchi vengono trasmessi da sottili « zattere » di pelle, staccatesi dal corpo. La zattera piú utile, dal punto di vista dello stafilococco, ha una grandezza media di 14 micron (0,014 millimetri) e ognuna può trasportare circa quattro unità microbiche vitali. Quando la persona si sposta qua e là, lascia cadere quei frammenti di pelle e ci sono tutti i motivi per pensare che anche la flora cada e sia presumibilmente disponibile per un altro ospite. Cosí la dispersione dei microrganismi è quasi costante; perfino i semplici movimenti connessi con il vestirsi o lo spogliarsi sono accompagnati dal distacco di un notevole numero di zattere con batteri.

Il termine « zattera » suggerisce un confronto con il modo in cui vennero popolate isole geograficamente isolate. Si ritiene che animali atipici e piante di isole remote siano in parte la conseguenza di casuali trasferimenti su zattere naturali (un albero spezzato, per esempio) che trasportavano organismi viventi attraverso il mare. Un esempio ben documentato di un trasferimento di questo tipo è dato dall'isola di Krakatoa, nelle Indie Orientali, che nel 1883 fu distrutta da una tremenda esplosione vulcanica. Charles S. Elton, della Oxford University, riscontrò che cinquant'anni dopo il cataclisma, nel 1933, l'isola di Krakatoa era nuovamente ricoperta di giungla e che almeno 720 specie di insetti e piú di 30 specie di vertebrati (compresi animali che non volano) erano riusciti ad attraversare le 25 miglia di mare che separano l'isola dalla terra piú vicina.

Si può paragonare Krakatoa a un neonato, e infatti il successo che hanno alcuni germi patogeni quando si fermano su un bambino può dipendere dal fatto di essere arrivati per primi. Il bambino, però, è esposto a vari microrganismi, oltre a quelli trasportati dalle zattere aeree; prima o poi prende contatto con parenti e amici, cioè con soggetti ben « colonizzati ». Dato che ora è possibile allevare, in speciali incubatrici, animali privi di germi fin dalla nascita, sarebbe interessante esporre tali animali solo all'inoculazione per via aerea e studiare poi quale tipo di flora cutanea si sviluppa.

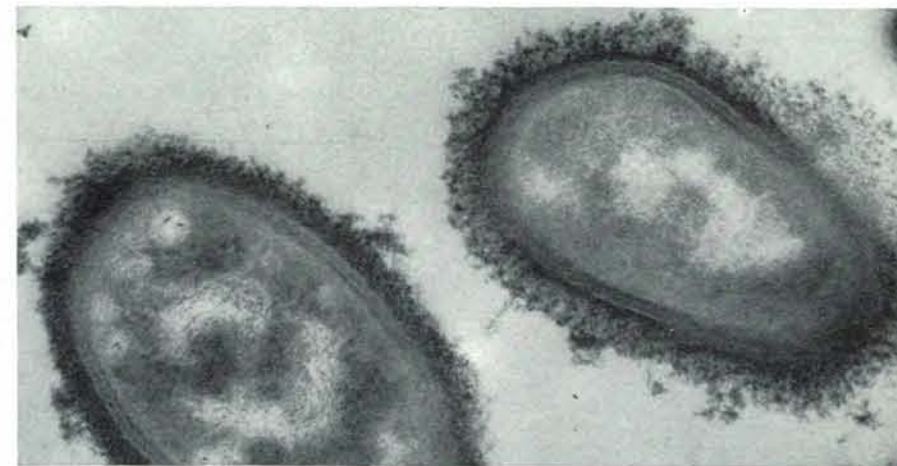
I microrganismi lasciano l'ospite, quindi, per via aerea e per contatto. Che succede quando un microrganismo arriva in un ambiente completamente colonizzato? Elton ha dimostrato che il neoarrivato ha notevoli possibilità di successo dove c'è una nicchia ecologica non sfruttata da abitanti indigeni, mentre l'insediamento in una zona con comunità già stabilita e complessa è molto difficile. Un esempio è fornito dal sorprendente numero di uccelli che si sono succeduti nella colonizzazione della Nuova Zelanda nel corso degli ultimi 100 anni. Pare non vi siano dubbi che ciò sia stato reso possibile dalle catastrofiche modificazioni nell'ecosistema della regione provocate dall'invasione degli europei. Dai colonizzatori vennero aperte nuove nicchie, comprese forse quelle abbandonate dalla fauna preesistente.

Considerando le nicchie ecologiche della pelle, siamo di nuovo obbligati a parlare in termini di germi patogeni, perché molto poco si sa sulle attività delle specie innocue. Cosí, i tentativi di dominare le infezioni ospedaliere da stafilococco mediante il trattamento dei portatori con antibiotici non hanno avuto molto successo, in quanto è verosimile che un ceppo resistente sostituisca gli originali abitanti delle narici. D'altronde Henry R. Shinefield e i suoi colleghi della School of Medicine dell'Università di California avevano ottenuto un notevole successo nel controllo dell'infezione nelle sale di maternità: ai bambini e a tutti quelli che hanno contatto con loro veniva inoculato uno stafilococco a bassa virulenza, di modo che i ceppi piú virulenti, per conquistare l'habitat, dovevano competere con i germi già residenti.

L'habitat degli stafilococchi nelle narici è piuttosto particolare, ma la situazione probabilmente è piú o meno la stessa sulla superficie « esterna » della cute. Quantunque organismi patogeni si posino di continuo sulla pelle, vi trovano un ambiente altamente sfavorevole e, in assenza di lesioni cutanee, una enorme difficoltà nel colonizzarla. Questa capacità di « autosterilizzazione cutanea » non sembra essere, come suggerirebbe l'aggettivo, un attributo della pelle stessa, ma piuttosto una caratteristica presentata da tutti gli ecosistemi bene sviluppati, cioè la tendenza da parte di tutti i componenti del sistema a mantenere lo status quo.

Tale omeostasi è chiaramente evidente nell'ecosistema della pelle e sappiamo qualcosa – benché non sia molto – sui processi interessati. La pelle è un habitat sfavorevole per la stragrande maggioranza dei microrganismi, perché è eccezionale che specie viventi, i cui quartieri generali sono normalmente il terreno, l'acqua e qualsiasi altra cosa ci circonda, si moltiplichino sulla superficie cutanea. Posto che sia intatta, la pelle è anche poco adatta allo sfruttamento da parte della maggior parte dei germi patogeni per l'uomo. Vi sono vari motivi che spiegano questo fenomeno. Per alcune specie la pelle è troppo acida. (Questo « mantello acido » era considerato un tempo la maggiore misura di protezione; ma oggi si ritiene che molti germi patogeni che non riescono a stabilirsi non vengano inibiti da esso.) Pochi dubbi sembrano esserci sul fatto che la pelle è troppo arida per la colonizzazione da parte di alcune specie; la continua desquamazione degli strati cutanei superficiali è un altro processo che impedisce lo stabilirsi degli invasori. Tuttavia, dal punto di vista ecologico, il piú interessante meccanismo di difesa è quello derivante dalle attività metaboliche della flora residente. È noto da qualche anno che gli acidi grassi insaturi sono un importante componente del sebo raccolto sulla superficie cutanea e che inibiscono la crescita di parecchi batteri e funghi cutanei patogeni. Recentemente è stato dimostrato che queste sostanze sono un prodotto metabolico dei membri Gram-positivi della comunità cutanea, i quali demoliscono, per mezzo di enzimi specifici, i lipidi piú complessi del sebo che viene escreto.

Questa attività delle specie Gram-positive aiuta a proteggere la pelle dall'invasione di potenziali patogeni. Inoltre le specie Gram-positive, anche se non necessariamene con gli stessi mezzi, esercitano un effetto restrittivo sulla crescita di popolazioni di microrganismi Gram-negativi.

Nell'ascella sana predominano le specie Gram-positive, ma sono presenti anche piccole quantità di organismi Gram-negativi. Se si adopera regolarmente un deodorante contenente un antibiotico ad azione selettiva sulle specie Gram-positive, la popolazione cutanea gradualmente si modifica fino a che i Gram-negativi raggiungono la densità dei Gram-positivi. Sospendendo l'uso del deodorante si ha il ritorno a una flora Gram-positiva predominante. Si direbbe che qualche caratteristica dei micrococchi e dei difteroidi presenti nell'ascella sia un fattore limitante per gli organismi Gram-negativi. Il fatto che l'odore delle ascelle sia assente quando gli organismi Gram-negativi sono predominanti indica anche che sono i sottoprodotti del metabolismo degli organismi delle specie Gram-positive a conferire il particolare odore.

Fotografia al microscopio elettronico di due *Corynebacterium minutissimum*, difteroidi (bacilli) comuni della pelle sana. La fotografia è di Leopoldo F. Montes, del Medical Center dell'Università dell'Alabama. L'ingrandimento è di circa 40 000 diametri.

Effetti chimici della luce

La luce visibile provoca poche reazioni chimiche nella materia inorganica, mentre i fotoni ultravioletti rompono facilmente i legami chimici generando frammenti molecolari a vita breve con insolite proprietà

di Gerald Oster

Il nostro mondo si mantiene quale noi lo vediamo ogni giorno perché la maggior parte delle sostanze che lo compongono, organiche e inorganiche, sono stabili in presenza della luce visibile. Solo poche molecole complesse, prodotte da organismi viventi, hanno infatti la specifica proprietà di iniziare una reazione chimica, o di prendervi parte, per l'effetto provocato dalla luce.

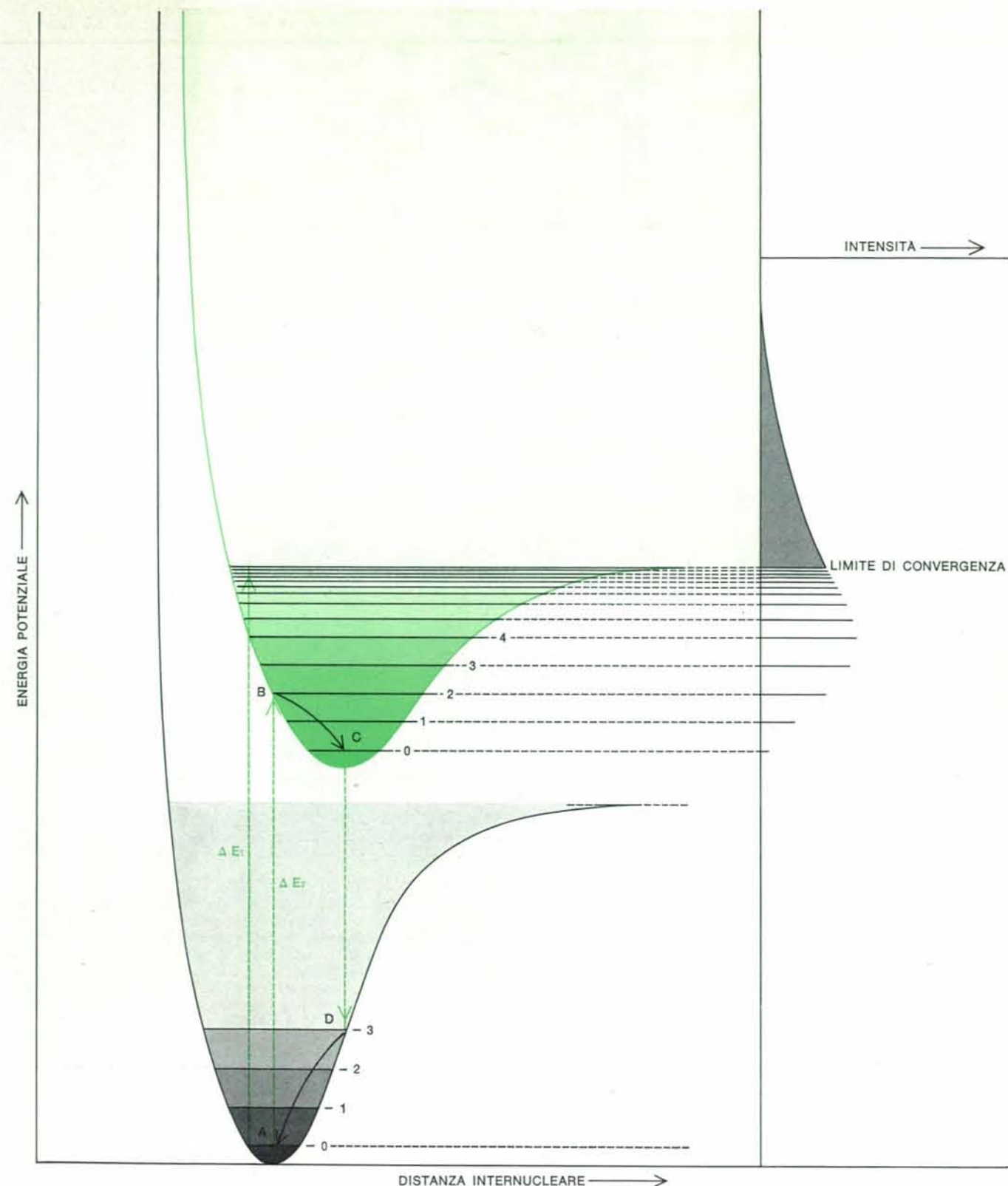
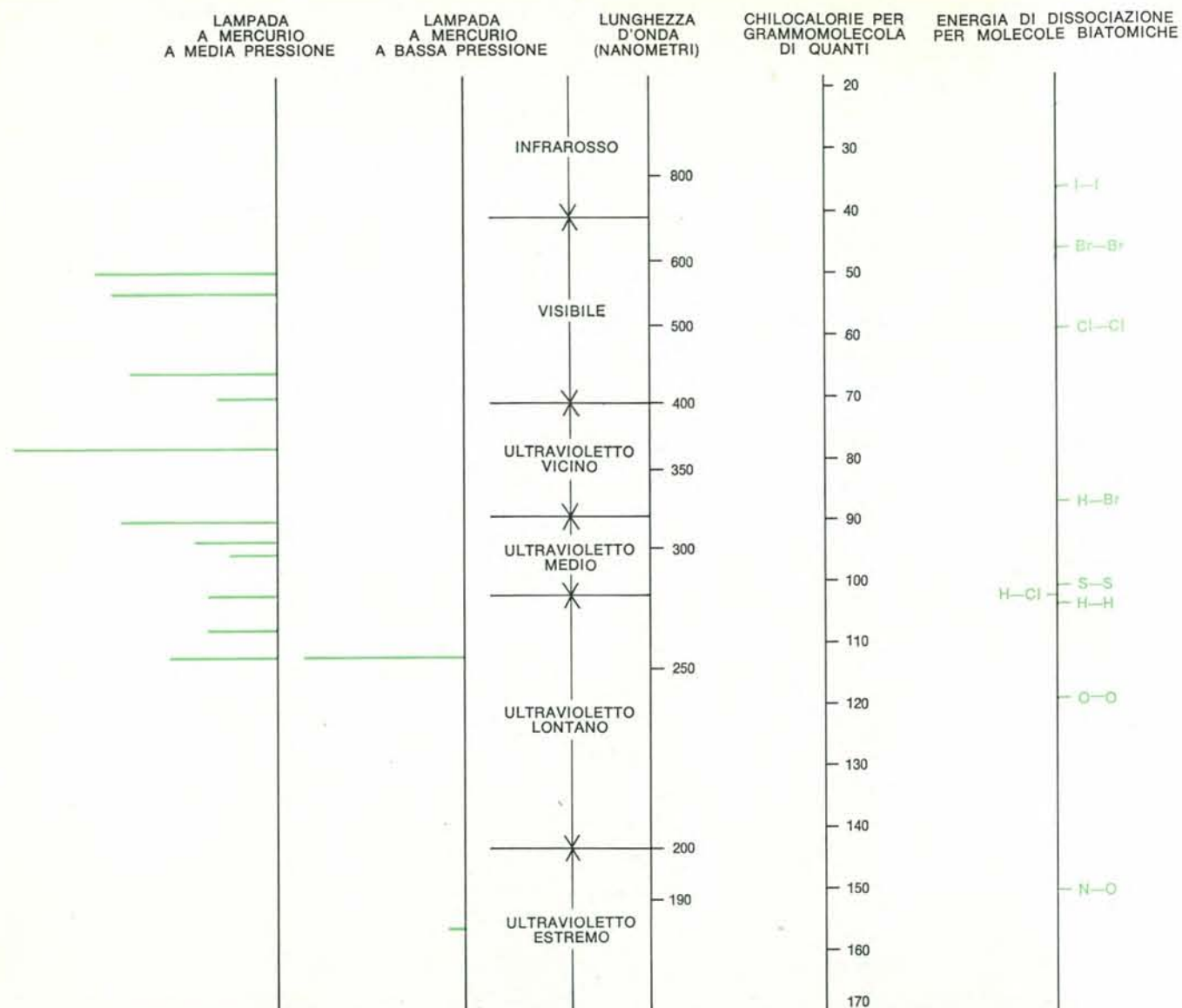
Fuori dell'ambito della materia vivente, le molecole che vengono attivate dalla luce visibile in modo tale da destare l'interesse di un fotochimico sono poche. Tuttavia la loro reattività cresce nettamente se si varia di poco la lunghezza d'onda dell'energia radiante, sempre restando nell'ultravioletto. E è appunto in tale regione spettrale che un fotochimico comincia ad aver a che fare con gli eventi che una radiazione ultravioletta, con lunghezza d'onda compresa fra i 180 e i 400 nanometri, è in grado di provocare. Questi eventi di solito si verificano tanto rapidamente che, per studiare le trasformazioni molecolari che coinvolgono, è stato necessario ricorrere a tecniche molto ingegnose. Oggi, per esempio, è ormai comune individuare specie molecolari che esistono per meno di un millesimo di secondo; sono state studiate anche particelle aventi una durata esprimibile in microsecondi e nuove tecniche, basate sugli impulsi laser, permetteranno forse entro breve tempo di misurare vite molecolari con durate dell'ordine del nanosecondo (10^{-9} secondi) e, forse, addirittura del picosecondo (10^{-12} secondi).

Il fotochimico si interessa a questi fenomeni non solo per studiare nuove specie con vita estremamente breve, ma soprattutto perché sospetta che molte, se non la maggior parte, delle reazioni chimiche procedano attraverso stadi intermedi costituiti da specie a vita brevissima. Solo seguendo il meccanismo delle reazioni passo per passo, in ogni dettaglio, è possibile sviluppare modelli plausibili complessivi; il passaggio da questi studi allo sviluppo di nuovi processi chimici e alla realizzazione di prodotti di interesse pratico è spesso solo un breve passo.

Quando un quanto di luce viene assorbito da una molecola, uno dei suoi elettroni passa in uno stato eccitato piú elevato. In queste condizioni, però, la molecola è instabile e tenterà di liberarsi, in un modo o nell'altro, dell'eccesso di energia. Solitamente l'energia di eccitazione elettronica viene convertita in energia vibrazionale (vibrazione degli atomi della molecola), che poi si trasferisce all'ambiente esterno sotto forma di calore; è il caso, per esempio, di un tetto di catrame in un giorno assolato. Un'altra soluzione a disposizione della molecola eccitata è quella di smaltire l'eccesso di energia per fluorescenza, cioè di emettere una radiazione con lunghezza d'onda leggermente maggiore di quella assorbita. L'aspetto azzurrognolo che una soluzione di chinina presenta alla luce solare è appunto un tipico esempio di fluorescenza: l'eccitazione è prodotta dai raggi ultravioletti, per noi invisibili, emessi dal Sole.

Esiste una terza via, che è quella che maggiormente interessa il fotochimico: la molecola eccitata può subire una trasformazione chimica. È poi compito del fotochimico determinare la natura dei prodotti risultanti, la loro quantità rispetto ai quanti assorbiti (il rendimento quantico) e come questi risultati dipendano dalla concentrazione dei materiali di partenza. Il passo ulteriore consiste nel trovare una corrispondenza tra questi dati e le proprietà termodinamiche e spettroscopiche note delle molecole coinvolte nel processo, per formare un quadro il piú possibile completo e coerente. Si deve tuttavia ammettere che solo le reazioni chimiche piú semplici sono conosciute in dettaglio.

C'è infine una quarta possibilità: la molecola può liberarsi dell'energia in eccesso spezzandosi, e si verifica cosí il fenomeno detto fotolisi. Come ci si potrebbe aspettare, la fotolisi avviene solo se l'energia del quanto assorbito supera quella propria del legame che tiene unita la molecola. L'energia necessaria per scindere fotoliticamente le molecole piú semplici si trova nella regione dell'ultravioletto (*si veda l'illustrazione a pag. 40*). Per esempio, la molecola del cloro è colorata e quindi assorbe luce nella regione del visibile (a 425 nanometri). In questo ambito la reazione di fotolisi ha però un rendimento quantico basso; quando invece è esposta a luce ultravioletta di 330 nanometri tale rendimento diventa pressoché unitario: ogni quanto assorbito scinde una molecola.

Albert Einstein propose nel 1905 che ogni singolo quanto di luce fosse in grado di produrre la fotolisi di una sola molecola; ma fu necessario attendere lo sviluppo della meccanica quantistica, verso la fine degli anni venti, per avere la spiegazione della dipendenza del rendimento quantico dalla lunghezza d'onda della radiazione eccitante. James Franck e Edward U. Condon, che analizzarono accuratamente l'eccitazione molecolare, rilevarono che quando una molecola passa dallo stato fondamentale a uno eccitato la transizione avviene tanto rapidamente che le distanze interatomiche nella molecola non hanno il tempo di cambiare, poiché il tempo richiesto perché avvenga la transizione è di gran lunga minore

L'effetto dei fotoni sulle molecole semplici può essere seguito con l'aiuto delle curve dell'energia potenziale. La curva piú bassa rappresenta l'energia potenziale di una tipica molecola biatomica nello stato fondamentale; quella in alto rappresenta invece la sua energia potenziale al primo livello elettronico eccitato. Poiché i due atomi vibrano costantemente, cambiando cosí le distanze fra i nuclei atomici, le molecole possono occupare differenti, ma ben determinati, livelli energetici (*linee orizzontali*) nell'ambito di ciascuno stato elettronico. La molecola che si trova nel piú basso livello dello stato fondamentale può essere dissociata, o fotolizzata, quando assorbe un fotone con energia uguale o maggiore di ΔE_1. Questa è l'energia richiesta per portarla fino al limite di convergenza oppure oltre. La lunghezza delle linee orizzontali poste sulla destra, sotto tale limite, rappresenta la possibilità di transizione dallo stato elettronico fondamentale a ciascun livello vibrazionale dello stato eccitato. Cosí un fotone dotato di energia ΔE_2 innalzerà la molecola fino al secondo livello (*B*) di quello stato. Qui la molecola vibrerà e, cedendo energia, cadrà al livello *C*. Ora potrà emettere un fotone, con energia leggermente minore di ΔE_2, e ricadere in *D*. Questo fenomeno è la fluorescenza. Dopo aver perso ulteriore energia vibrazionale, la molecola ritornerà in *A*.

L'energia di dissociazione delle piú comuni molecole biatomiche è cosí elevata che solo le radiazioni ultraviolette sono in grado di fornirla. Le principali eccezioni sono le molecole del cloro, del bromo e dello iodio, tutte fortemente colorate, il che dimostra che esse assorbono luce. L'energia portata da un quanto di luce, o fotone, è direttamente proporzionale alla sua frequenza ovvero inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda. In una grammomolecola di quanti sono contenuti $6,06 \times 10^{23}$ fotoni, quelli cioè che sono necessari per dissociare una grammomolecola ($6,06 \times 10^{23}$ molecole) di una molecola biatomica se il rendimento quantico è unitario. Una grammomolecola è il peso in grammi equivalente al peso molecolare di una molecola; per esempio, la grammomolecola dell'ossigeno (O_2) è 32 grammi. A sinistra sono riportate le lunghezze d'onda delle principali emissioni di due lampade a mercurio di uso comune; la lunghezza delle righe è proporzionale all'intensità.

del periodo di vibrazione caratteristico degli atomi che costituiscono la molecola.

Per comprendere ciò che avviene quando una molecola è eccitata dalla luce sarà utile riferirsi all'illustrazione della pagina precedente. La curva inferiore rappresenta l'energia potenziale di una molecola biatomica in vibrazione nello stato fondamentale, mentre la curva superiore esprime l'energia potenziale della molecola eccitata, anch'essa vibrante; le linee orizzontali nella parte inferiore di ciascuna curva indicano l'energia di alcuni livelli vibrazionali. Se, nello stato fondamentale, la distanza interatomica diventa abbastanza grande, la molecola può scindersi senza passare attraverso lo stato eccitato. La curva dello stato eccitato è spostata verso destra, rispetto a quella dello stato fondamentale, per indicare che la distanza interatomica media è leggermente maggiore nello stato eccitato che in quello fondamentale, cioè che la molecola eccitata gode, in un certo senso, di maggiore libertà.

La molecola può passare dallo stato fondamentale a uno degli stati eccitati assorbendo una radiazione la cui energia sia uguale alla differenza di energia fra i due stati. Supponendo che il quanto di radiazione non sia troppo energetico, la molecola rimarrà intatta e continuerà a vibrare; dopo un breve intervallo ritornerà allo stato fondamentale emettendo un quanto di radiazione. Poiché l'emissione avviene quando la molecola eccitata si trova al livello vibrazionale piú basso, l'energia è minore di quella assorbita, e quindi la lunghezza d'onda della radiazione fluorescente è maggiore di quella della radiazione eccitante.

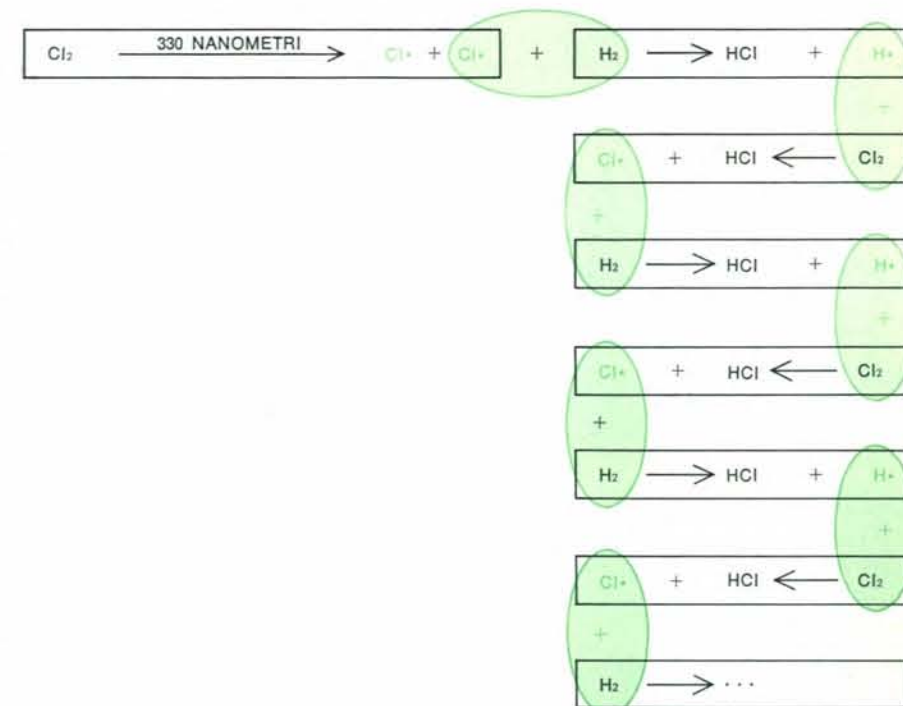
Quando la radiazione assorbita supera un certo limite, la molecola si spezza: avviene la fotolisi. A questo punto lo spettro di assorbimento (come si può notare nella parte destra dell'illustrazione) diventa continuo perché la molecola non vibra piú a livelli energetici discreti (finché la molecola è intatta può assorbire infatti soltanto quanti di luce aventi lunghezza d'onda ben definita).

La molecola può passare dallo stato eccitato a quello fondamentale anche senza emettere il quanto di luce e, in questo caso, l'energia elettronica viene dissipata sotto forma di calore. Franck e Condon spiegarono che questo si verifica in seguito alla sovrapposizione (o incrocio) delle due curve che rappresentano l'energia potenziale, cosicché la molecola eccitata scivola, per modo di dire, nello stato fondamentale, mantenendo uno stato anormale di alta eccitazione. Questa energia vibrazionale viene poi prontamente trasmessa alle molecole circostanti.

La reazione di fotolisi piú importante che si abbia in natura, per quanto riguarda la vita sulla Terra, è quella che crea, negli strati superiori dell'atmosfera, una protezione di ozono, un gas azzurrognolo che, a differenza dell'ossigeno comune, presenta una molecola avente tre atomi di ossigeno anziché due. L'ozono, per nostra fortuna, assorbe interamente le radiazioni dell'ultravioletto medio e lontano, con un massimo a 255 nanometri, che sarebbero fatali agli organismi viventi.

La produzione dell'ozono inizia con la fotolisi delle molecole di ossigeno (O_2), che avviene quando l'ossigeno assorbe forti radiazioni ultraviolette con lunghezza d'onda di 190 nanometri. Gli atomi scissi fotoliticamente possono combinarsi fra loro per ripristinare la molecola iniziale oppure reagire con un altro atomo libero per formare una molecola di ozono (O_3). Quando poi l'ozono viene a sua volta investito dalla radiazione ultravioletta del Sole, o subisce la fotolisi (producendo O_2 e O) oppure contribuisce al riscaldamento dell'atmosfera. In questo modo si raggiunge un equilibrio dinamico fra la reazione di fotolisi e quella di sintesi dell'ozono.

Agli inizi del secolo i chimico-fisici si trovarono di fronte a una specie di enigma fotolitico: era stato osservato che quando cloro e idrogeno puri venivano esposti alla luce ultravioletta, il rendimento quantico si avvicinava al milione, cioè per ogni quanto luminoso assorbito si formava circa un milione di molecole di acido cloridrico (HCl). Questo fenomeno sembrò contraddire il postulato di Einstein secondo il quale il rendimento quantico avrebbe dovuto essere unitario. Nel 1912 Max Bodenstein spiegò l'enigma proponendo l'ipotesi che la reazione seguisse un meccanismo a catena (*si veda la figura in alto in questa pagina*).

La reazione a catena procede per mezzo di due reazioni, successive alla fotolisi del cloro (Cl_2): la prima reazione, che comporta la rottura del legame abbastanza forte H—H, provoca un lieve deficit di energia, mentre la seconda, che prevede la rottura del legame piú debole Cl—Cl, compensa largamente il deficit energetico dell'altra. Per rompere il legame H—H sono necessarie 104 chilocalorie per gram-

Quando cloro e idrogeno puri sono sottoposti alle radiazioni ultraviolette (particolarmente efficaci sono quelle che hanno lunghezza d'onda di 330 nanometri) si produce una reazione a catena. Una tale radiazione è sufficientemente energetica per la dissociazione delle molecole di cloro, che richiede solo 50 chilocalorie per grammomolecola, ma è troppo debole per scindere le molecole di idrogeno, che ne richiedono 104. La reazione successiva, che porta alla formazione di HCl, fornisce 103 chilocalorie per grammomolecola. Dal momento che per rompere il legame H—H sono richieste 104 chilocalorie, la reazione fra cloro atomico (Cl·) e H_2 comporta un deficit netto di una chilocaloria per grammomolecola. Tuttavia l'anello successivo della catena, che consiste nell'interazione fra H· e Cl_2, fornisce un attivo di 45 chilocalorie (103 — 58) per grammomolecola. Questo surplus energetico consente il proseguimento della reazione.

La fotolisi dell'acetone, che produce in prevalenza etano e ossido di carbonio, è una reazione molto studiata. Se ne comprese il meccanismo solo postulando l'esistenza di radicali liberi, corpuscoli a breve durata aventi elettroni di valenza non compensati.

La teoria dello stato di tripletto è diventata assai importante per comprendere le reazioni fotochimiche di molte molecole organiche. Come tutte le molecole, anch'esse possono essere spinte a uno degli stati eccitati assorbendo radiazioni. Possono poi tornare allo stato fondamentale per normale fluorescenza (riemissione di un fotone) ma possono anche finire, senza emettere radiazioni, nello stato di tripletto (le linee spezzate indicano transizioni non radiative). L'esistenza di questo può essere dedotta dalla lunghezza d'onda della radiazione che può poi essere assorbita per passare a uno stato di tripletto piú alto. Lo stato di tripletto ha origine quando gli spin dei doppietti elettronici sono diretti nello stesso verso anziché in verso opposto, come si ha di solito.

momolecola (una grammomolecola è l'equivalente in grammi del peso molecolare dei reagenti, in questo caso H_2) e per il legame Cl—Cl ne accorrono 58. In seguito alla rottura di questi legami si sintetizza HCl, la cui formazione comporta lo sviluppo di 103 chilocalorie per grammomolecola. Ne risulta che la prima reazione presenta un deficit di 1 chilocaloria per grammomolecola, mentre la seconda ha un attivo di 45 (103-58) chilocalorie: le due reazioni accoppiate sviluppano 44 chilocalorie per grammomolecola. In questo modo viene fornita l'energia che consente il procedere della reazione a catena una volta che una radiazione ultravioletta abbia provveduto alla rottura iniziale dei legami Cl—Cl.

La catena continua fin quando due atomi di cloro non si incontrano per formare una molecola. Ciò può verificarsi soprattutto alle pareti del recipiente in cui avviene la reazione che possono dissipare l'energia di eccitazione elettronica degli atomi di cloro e consentire la formazione di cloro molecolare. Analogo effetto può essere causato da impurezze presenti nell'ambiente di reazione.

Le molecole di bromo reagiscono con l'idrogeno per formare acido bromidrico secondo un analogo processo fotochimico, ma con rendimento quantico minore perché il bromo atomico reagisce con l'idrogeno meno vigorosamente del cloro. Gli atomi di bromo reagiscono tuttavia senza difficoltà con le olefine (molecole di idrocarburi, a catena lineare o ramificata, che contengono un doppio legame). In questo caso ogni doppio legame viene sostituito da due atomi di bromo. Questo è il principio fondamentale del processo di fotobromurazione industriale degli idrocarburi. La bromurazione può essere condotta anche per via termica, scaldando i reattivi in presenza di catalizzatori, ma c'è l'inconveniente che, operando in tale modo, si rende possibile la reazione di decomposizione dei prodotti stessi. A vantaggio del processo fotochimico depone inoltre il fatto che i prodotti risultanti non sono sensibili alle radiazioni ultraviolette.

Un importante processo di fotoclorurazione industriale è stato sviluppato dalla Goodrich Company in seguito alla scoperta che se il cloruro di polivinile viene esposto al cloro in presenza di radiazioni ultraviolette ne risulta un materiale plastico avente una temperatura di deformazione termica superiore di 50 °C a quella del materiale non trattato. Un'applicazione immediata è che questa materia plastica cosí poco costosa può essere usata per costruire tubazioni di acqua calda negli impianti idraulici.

Una reazione fotolitica molto studiata coinvolge l'acetone (C_2H_6CO) che, esposto ai raggi ultravioletti, produce, con rendimento quantico vicino all'unità, etano, ossido di carbonio e svariati sottoprodotti dipendenti dalla lunghezza d'onda della radiazione eccitante. I risultati si possono spiegare in base a teorie che ammettano la presenza di radicali liberi in molecole con struttura elettronica incompleta: la fotolisi dell'acetone produce radicali metilici (CH_3CO); due radicali metilici, reagendo fra loro, formano l'etano *(si veda l'illustrazione in basso a pag. 41).*

W. A. Noyes jr. dell'Università di Rochester e altri ammisero l'esistenza di questi radicali liberi per spiegare i prodotti finali delle fotolisi ma, siccome la loro vita media è dell'ordine del decimillesimo di secondo, non è possibile isolarli per studiarli meglio. Tuttavia, dopo la fine della seconda guerra mondiale, sono state sviluppate tecniche che consentono di registrarne la presenza nonostante la breve durata della loro vita.

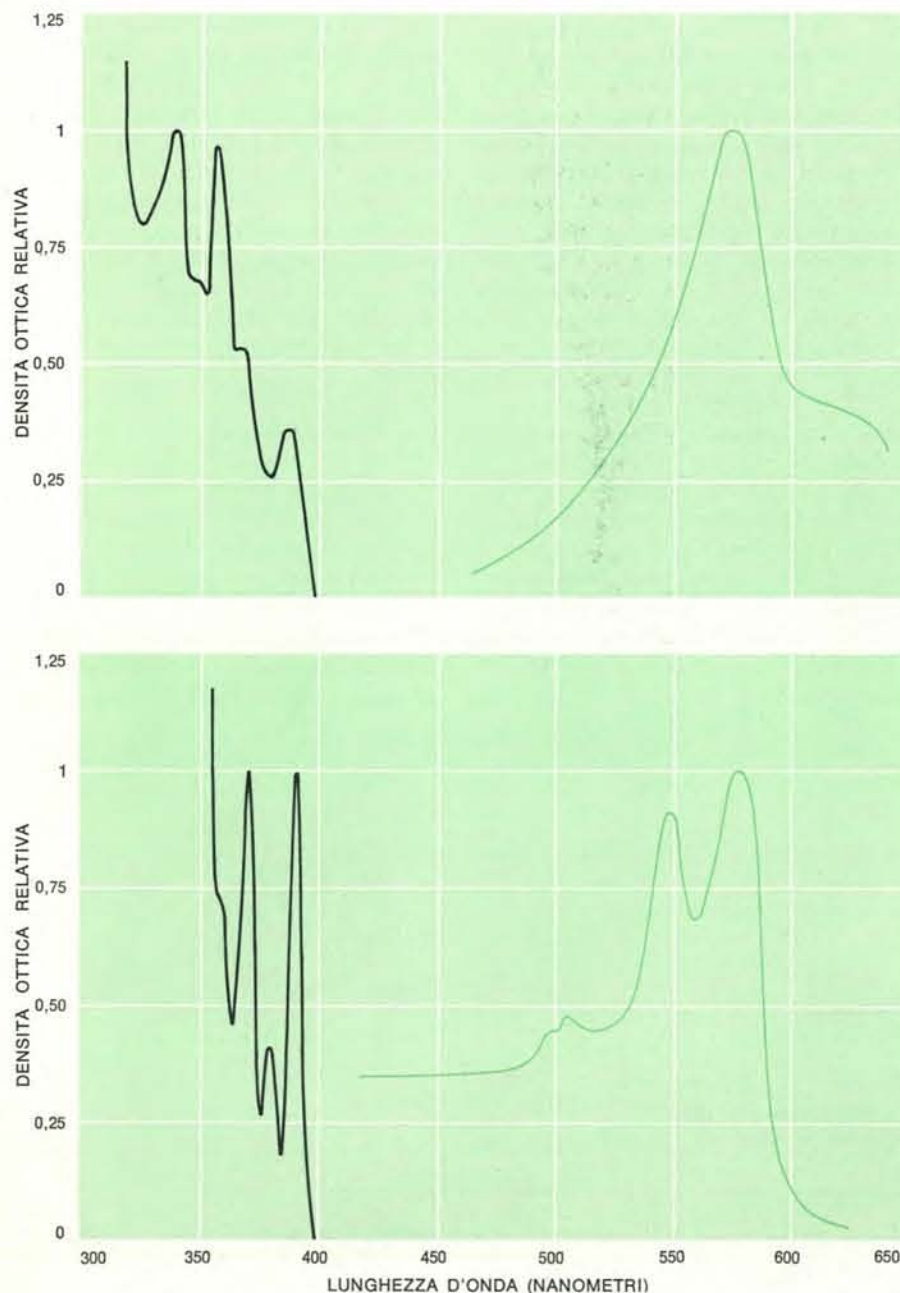
Una di queste tecniche fu escogitata all'Università di Cambridge da R.G. W. Norrish e dal suo allievo George Porter, che ora è direttore della Royal Institution. Essi progettarono un apparecchio *(si veda l'illustrazione in basso)* nel quale un campione è investito da un intenso lampo di luce ultravioletta che provoca il processo fotolitico. Una breve frazione di secondo piú tardi viene inviato nella camera di reazione un fascio di luce meno intenso che, dopo aver attraversata tutta la camera, entra in uno spettrografo, il quale registra le lunghezze d'onda non assorbite. Le lunghezze d'onda assorbite chiariscono la natura delle specie chimiche a vita breve prodotte dalla fotolisi. Nel 1967 Norrish e Porter condivisero il premio Nobel per la chimica con Manfred Eigen, dell'Università di Gottinga, che pure ha sviluppato tecniche per lo studio di reazioni veloci (si veda l'articolo di Larry Faller *Metodi di rilassamento in chimica*, in « Le Scienze », n. 11, luglio 1969).

Questa tecnica spettroscopica ha grandemente aumentato le conoscenze dei chimici a proposito dello stato di tripletto, uno stato eccitato che coinvolge i doppietti elettronici che formano i legami nelle molecole organiche. Di solito gli spin dei doppietti elettronici sono antiparalleli, cioè orientati in verso opposto. Quando le molecole sono investite da luce ultravioletta, passano dapprima al primo livello eccitato e poi compiono una transizione senza emissione di radiazione verso un livello intermedio nel quale gli spin di due elettroni nello stesso stato sono paralleli: questo è lo stato di tripletto. Quando la molecola in questo stato è nuovamente esposta alla luce visibile o ultravioletta, presenta uno spettro di assorbimento caratteristico, che si trova spostato verso le lunghezze d'onda piú lunghe rispetto a quello dello stato fondamentale, o stato di minor energia *(si veda l'illustrazione nella pagina a fronte).*

La teoria dello stato di tripletto nelle molecole organiche è dovuta principalmente al lavoro compiuto da G. N. Lewis e dai suoi collaboratori all'Università di California a Berkeley, alla fine degli anni trenta e agli inizi del decennio successivo. Questi ricercatori scoprirono che dissolvendo i coloranti, in particolare le fluoresceine, in un mezzo rigido quale il vetro, e poi

L'apparato per la fotolisi a lampo fu inventato da R.G.W. Norrish e G. Porter che con esso scoprirono lo stato di tripletto a breve durata che segue la fotolisi di varie specie di molecole, sia organiche sia inorganiche. La reazione viene innescata dalla lampada di fotolisi che produce un intenso bagliore di luce ultravioletta. Un millesimo di secondo piú tardi un'altra lampada invia un fascio di luce ultravioletta attraverso l'ambiente di reazione. I radicali liberi che si trovano nello stato di tripletto assorbono varie lunghezze d'onda (assorbimento tripletto-tripletto) e lo spettro risultante è registrato dallo spettrografo.

esponendoli a luce intensa, si osserva un cambiamento di colore. Eliminando la sorgente luminosa, i coloranti tornano al colore primitivo dopo circa un secondo. Questo fenomeno è molto generale, e viene chiamato fotocromatismo. Lewis dedusse da ciò l'esistenza dello stato di tripletto e attribuí la sua durata relativamente lunga al tempo richiesto dagli elettroni aventi spin paralleli per disaccoppiarsi e tornare allo stato normale antiparallelo.

Nel 1952 Porter e M. W. Windsor usarono la tecnica spettroscopica di Norrish e Porter per cercare lo stato di tripletto negli spettri delle molecole organiche sciolte negli ordinari solventi fluidi, ottenendo un successo pressoché immediato. Trovarono che in tali condizioni lo stato di tripletto aveva una durata di circa un millesimo di secondo.

L'assorbimento tripletto-tripletto della luce visibile è stato osservato nel laboratorio dell'autore al Polytechnic Institute di Brooklyn. Le sue apparecchiature mandano, su campioni amalgamati in supporto plastico, un fascio di radiazioni ultraviolette e, in direzione perpendicolare a questo, luce visibile. Gli spettri di assorbimento della luce visibile vengono perciò registrati in presenza delle radiazioni ultraviolette. Le curve nere poste a sinistra in questi due esempi rappresentano l'assorbimento dello stato elettronico fondamentale; le curve colorate, a destra, visualizzano l'assorbimento della luce visibile che spinge la molecola eccitata dallo stato di tripletto inferiore a quello superiore. Lo spettrogramma superiore è stato ottenuto dal crisene, quello inferiore dal 1,2,5,6-dibenzantracene, entrambi idrocarburi aromatici ottenuti dal catrame.

Nella conferenza tenuta in occasione del suo premio Nobel, Porter disse: « Qualsiasi discussione sul meccanismo della fotochimica organica implica necessariamente lo stato di tripletto e i dubbi su tale stato ottengono immediata risposta per mezzo della fotolisi ottenuta con brevi lampi di luce. Oggi si sa che molte delle piú importanti reazioni fotochimiche in soluzione, come quelle dei chinoni e dei chetoni, procedono quasi esclusivamente passando attraverso lo stato di tripletto e perciò le proprietà di questo stato diventano della massima importanza ».

Mentre studiavamo il comportamento fotochimico dei coloranti in soluzione al Polytechnic Institute of Brooklyn, io e il mio allievo Albert H. Adelman abbiamo dimostrato che la fase chimicamente reattiva del colorante è appunto rappresentata dallo stato di tripletto. Precisamente, quando certi colori sono eccitati dalla luce in presenza di sostanze che cedono elettroni, i coloranti vengono rapidamente trasformati nella forma (« ridotta ») incolore. I nostri studi hanno dimostrato che la fase reattiva del colorante – lo stato di tripletto – ha una durata di circa un decimillesimo di secondo. Il colorante è ora un forte mezzo riducente e, tornando al suo stato originario di ossidazione (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*), cederà elettroni ad altre sostanze. In altre parole il colorante si comporta da fotosensibilizzante nei processi di riduzione chimica; la luce visibile fornisce l'energia per iniziare la reazione.

Nel corso di questi studi ho scoperto che i radicali liberi si formano quando i coloranti vengono fotoridotti. I radicali liberi manifestano la propria presenza facendo in modo che i monomeri vinilici si leghino fra loro per formare polimeri. L'uso di radicali liberi per far avvenire la polimerizzazione di monomeri è ben conosciuto nell'industria chimica. Mi è capitato di notare che, aggiungendo opportuni coloranti in soluzioni di monomeri, si sarebbero potute gettare le basi di un nuovo tipo di fotografia. In una simile soluzione la concentrazione dei radicali liberi dovrebbe essere proporzionale all'intensità della luce visibile e in questo modo il grado di polimerizzazione dovrebbe poter essere controllato per mezzo della luce. Si è verificato che con questo metodo è possibile produrre con grande accuratezza mappe topografiche tridimensionali in plastica.

L'uso di coloranti quali fotosensibilizzanti è ovviamente fondamentale in fotografia. Nel 1873 Hermann Wilhelm Vogel trovò che, aggiungendo coloranti a emulsioni di alogenuri di argento, era possibile ottenere lastre fotografiche sensibili alla luce visibile. Inizialmente queste lastre rispondevano solo all'azione della luce nell'estremo blu dello spettro; in seguito furono trovati nuovi pigmenti in grado di estendere sempre piú la sensibilità verso l'estremo rosso dello spettro e di consentire cosí la realizzazione di emulsioni pancromatiche. Le ditte di materiale fotografico continuano ora a sintetizzare nuovi coloranti alla ricerca di sensibilizzanti in grado di operare efficientemente nell'ambito dell'infrarosso. Comunque, a circa cent'anni dalla sua prima scoperta, l'azione dei sensibilizzanti nelle emulsioni convenzionali è ancora oscura; si pensa che il loro effetto dipenda dallo stato di aggregazione del colorante assorbito nei cristalli dell'alogenuro.

Anche il fenomeno inverso della fotoriduzione – la fotoossidazione – può essere mediato da coloranti, come abbiamo scoperto nel nostro laboratorio, e anche in questo caso la specie reattiva del colorante è rappresentata dal colorante nello stato di tripletto. Abbiamo trovato che gli unici coloranti che possono servire come sensibilizzanti nel processo di fotoossidazione sono quelli che possono essere ridotti in presenza della luce.

Il colorante ossidato – la sua forma perossidata – è un forte mezzo ossidante e durante i processi di ossidazione di altre sostanze viene rigenerato il colorante (*si veda l'illustrazione qui accanto*). Io e la mia allieva Judith S. Bellin abbiamo dimostrato questo fenomeno e abbiamo impiegato la fotoossidazione sensibilizzata da coloranti per rendere inattivi alcuni sistemi biologici includenti virus, DNA e cellule cancerose. Che i coloranti fossero dei sensibilizzanti nella disattivazione biologica operata dalla luce visibile fu dimostrato per la prima volta nel 1900 da O. Raab, il quale osservò che mentre un colorante non era in grado di uccidere una coltura di protozoi, ciò si verificava quando la coltura veniva posta vicino a una finestra.

La disattivazione che risulta dalla sensibilizzazione per mezzo di coloranti è diversa da quella che si ottiene esponendo il sistema biologico alle radiazioni ultraviolette. In questo caso sembra che la disattivazione sia dovuta al formarsi di dimeri, enti chimici costituiti da due subunità minori, identiche o simili, connesse fra loro. La fotodimerizzazione è implicata, per esempio, nell'azione battericida delle radiazioni ultraviolette. È noto da lungo tempo che lo spettro dell'azione battericida (curva che esprime la mortalità batterica in funzione della lunghezza d'onda) è strettamente parallelo allo spettro d'assorbimento del DNA, la molecola genetica. Se pellicole essiccate di DNA sono irradiate con luce ultravioletta si costituiscono legami incrociati. Secondo le teorie moderne, la formazione dei legami incrociati si verifica in seguito alla dimerizzazione della timina, uno dei gruppi costituenti il DNA.

Sebbene questo possa essere il modo in cui agisce la radiazione ultravioletta, è mia impressione personale che sia stata data una considerazione insufficiente alla fotolisi dei legami disolfurici contenuti nelle proteine dei batteri. Questo tipo di legame è facilmente spezzato dalle radiazioni ultraviolette e ha uno spettro d'assorbimento simile a quello del DNA. I legami disolfurici sono essenziali per mantenere la struttura e l'attività delle proteine; la loro distruzione a opera dei raggi ultravioletti potrebbe anche essere in relazione con la morte dei batteri.

Usando coloranti come promotori per iniziare reazioni chimiche, stiamo compiendo i primi passi in un ambito in cui la natura ha imparato a lavorare con estrema raffinatezza. All'interno delle foglie delle piante, il colorante verde clorofilla, quando è attivato dalla luce, catalizza una serie di reazioni chimiche che dissocia l'anidride carbonica e l'acqua (composti del tutto stabili in presenza della sola luce visibile) e riunisce i loro costituenti per formare zuccheri e amidi. Un sogno dei fotochimici è trovare un colorante, o sensibilizzante, in grado di provocare le stesse reazioni in un sistema ove non sia presente la vita, perché c'è ragione di sperare che un sistema di questo tipo sia molto meno complesso di una cellula vivente.

ASSORBIMENTO DI LUCE VISIBILE
D COLORANTE NELLO STATO FONDAMENTALE
D* PRIMO LIVELLO ECCITATO
D' STATO DI TRIPLETTO
OSSIGENO
DONATORE DI ELETTRONI
D FORMA PEROSSIDATA
D FORMA RIDOTTA
+
+
SUBSTRATO S
S SUBSTRATO
OSSIDATO S
D
S RIDOTTO
(COLORANTE RIGENERATO)

Alcune strane proprietà dello stato di tripletto sono state esplorate dall'autore. Certi coloranti nello stato di tripletto possono agire sia come forti ossidanti sia come forti riducenti, in rapporto alle condizioni a cui lo stesso stato di tripletto viene esposto. In presenza di donatori di elettroni (cioè di riducenti), il colorante viene ridotto e può in seguito cedere elettroni ad altre sostanze (*substrato S*). In presenza di ossidanti il colorante si ossida fortemente e può quindi ossidare il substrato, cioè togliergli elettroni. In entrambi i casi il colorante si rigenera e torna allo stato normale. Gli studi dell'autore hanno dimostrato che la fase reattiva del colorante dura solo 10^{-3} s.

Gli elementi sintetici

Nel 1963 erano stati ottenuti tutti gli elementi fino a quello di numero atomico 103. Recenti ricerche inducono a ritenere che sia possibile estendere l'elenco fino all'elemento 114 e anche oltre

di Glenn T. Seaborg e Justin L. Bloom

Fino all'aprile 1963 erano stati ottenuti 11 elementi transuranici, cioè piú pesanti dell'uranio, e quindi si era giunti fino all'elemento 103, il laurenzio. Negli ultimi sei anni si sono avute prove sempre piú chiare dell'esistenza dell'elemento 104 e qualche prova, però non decisiva, dell'esistenza dell'elemento 105. Lo scopo principale di questo articolo è di fare un riepilogo delle piú recenti ricerche che hanno dato l'avvio all'eccitante prospettiva di poter allungare l'elenco degli elementi in misura ben maggiore di quanto fino a oggi si ritenesse possibile.

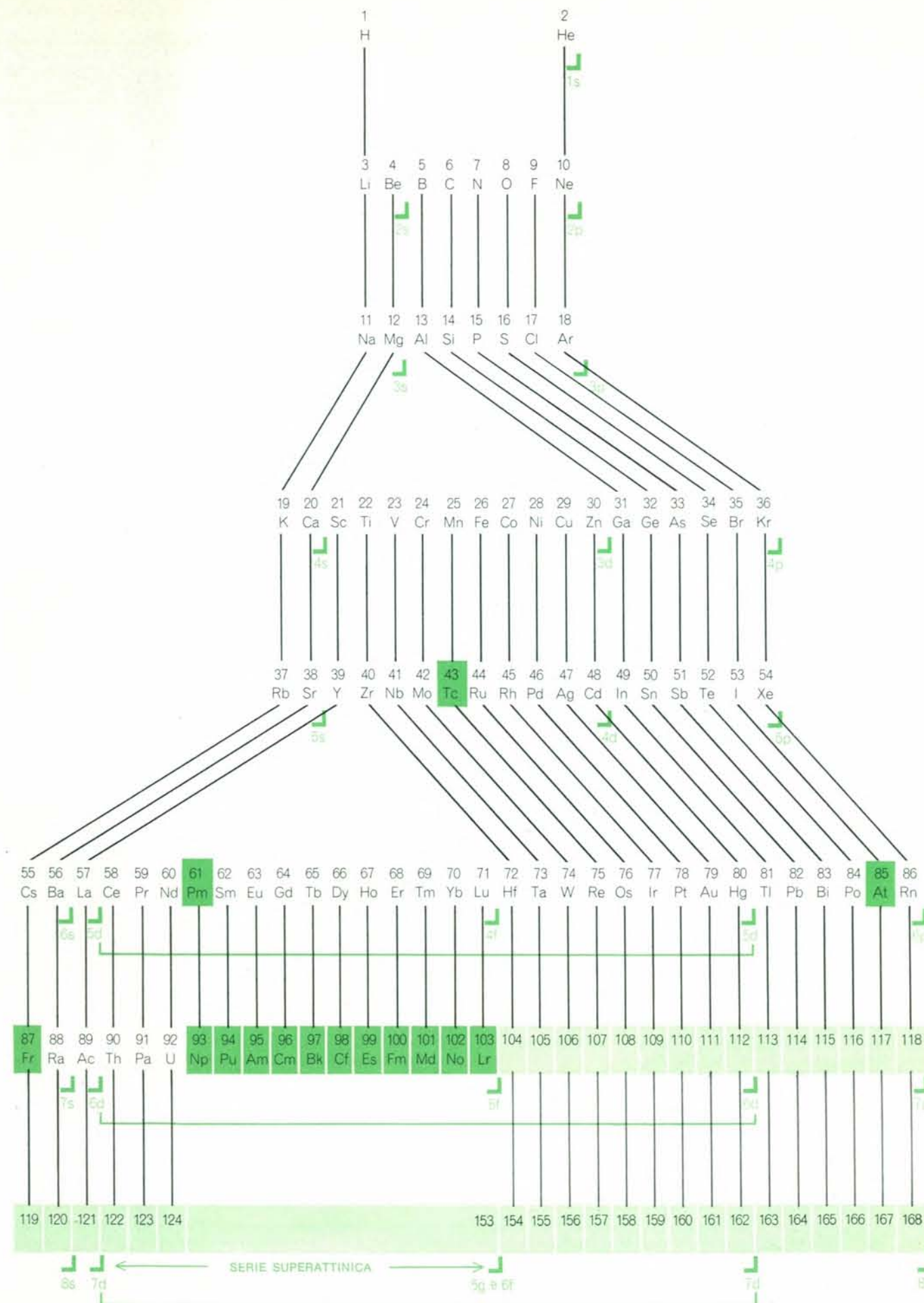
Riteniamo utile ricordare alcuni dati fondamentali. Le proprietà chimiche di un elemento sono determinate dal numero di elettroni che si trovano nella nube elettronica che circonda il nucleo di ogni atomo dell'elemento. Questo numero è a sua volta determinato dal numero di cariche positive, o protoni, del nucleo. Il numero atomico di un elemento è dato dal numero di protoni: l'idrogeno ne ha uno, l'elio due, l'uranio 92, e cosí via. Gli elementi vengono comunemente raggruppati in un sistema periodico, che esprime in maniera schematica certe analogie di comportamento chimico (*si veda la figura alla pagina seguente*).

Benché un elemento sia caratterizzato dal numero di protoni contenuti nel nucleo, il numero di particelle scariche, o neutroni, associate a un dato numero di protoni può variare. Ciò fa sí che un elemento possa esistere in varie forme, dette isotopiche, che differiscono per peso e stabilità, ma hanno proprietà chimiche pressoché uguali. La somma del numero di protoni e del numero di neutroni di una specie nucleare dà il numero di massa di quella specie. Per esempio, l'uranio-238 ha i 92 protoni caratteristici dell'elemento e 146 neutroni; questo isotopo può essere indicato con ^{238}U o, piú rigorosamente, con $^{238}_{92}U$. La maggior parte degli isotopi sono instabili, e tendono quindi a decadere in altri isotopi o elementi per radiazione beta (emissione di elettroni positivi o negativi da parte di particelle nucleari), per radiazione alfa (emissione di particelle alfa, che sono costituite da due protoni e due neutroni) o per fissione spontanea. Oltre a questi tre tipi fondamentali di decadimento radioattivo ne esistono però anche altri.

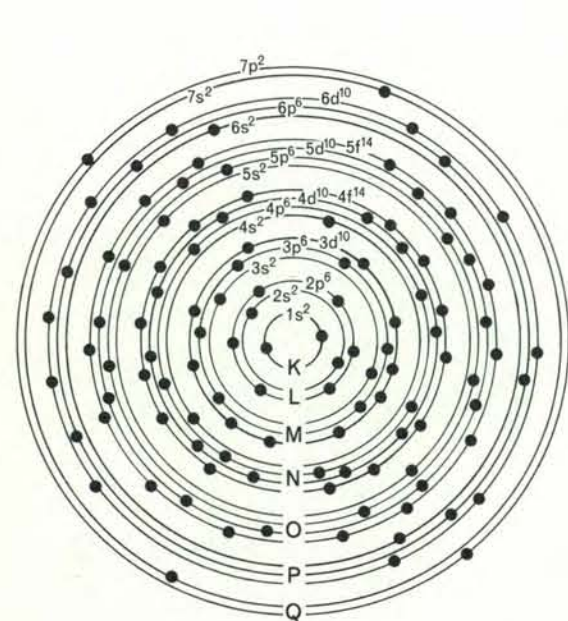
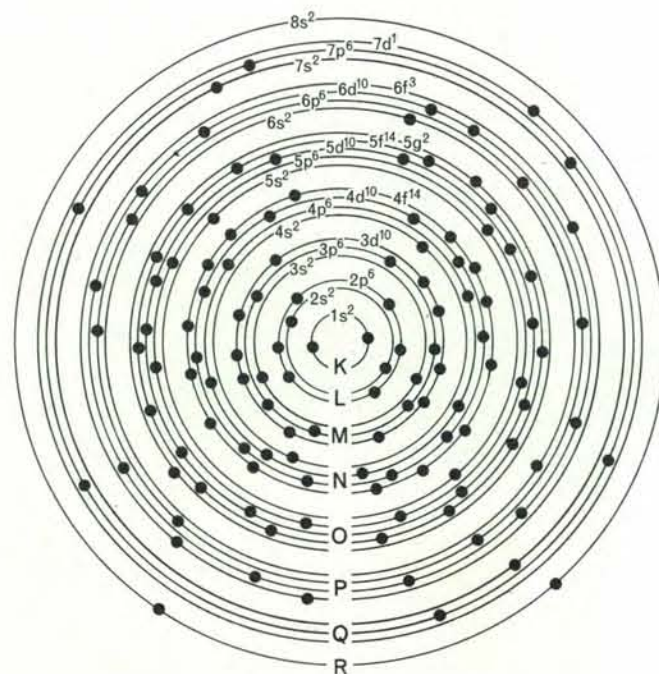
La creazione di un nuovo elemento pesante è sostanzialmente il processo inverso del decadimento: per esempio, al nucleo di un elemento esistente possono venire aggiunti dei protoni mediante un acceleratore di particelle, come un ciclotrone o un acceleratore lineare. Un altro metodo consiste nell'aumentare il numero di massa di un elemento esistente aumentando il numero di neutroni nel nucleo. Un neutrone nel nucleo può poi emettere un elettrone in un processo di decadimento radioattivo e diventare cosí un protone. In questo modo il numero di massa aumenta di una unità. I neutroni possono essere ottenuti da un acceleratore, da un reattore o da un'esplosione nucleare. Dato che sono scarichi, possono entrare facilmente nel nucleo, carico positivamente, dell'elemento bersaglio, senza dover essere accelerati ad alte energie.

Per prevedere la natura degli elementi e per riconoscerli è utile conoscere la relazione di somiglianza – prevista da uno di noi (Seaborg) nel 1944 – che esiste tra numerosi elementi. Questa relazione trae origine dal fatto che gli elettroni sono distribuiti intorno al nucleo in una serie di « gusci » e « sottogusci », che in realtà sono una rappresentazione fisica semplificata dei livelli energetici quantomeccanici (*si veda la figura a pagina 48*). Noi avevamo previsto che gli elementi dal 90 al 103 avrebbero avuto proprietà molto simili a quelle della serie delle terre rare, che va dal 58 al 71 e è stata chiamata serie dei lantanidi perché gli elementi di cui è formata hanno proprietà chimiche simili a quelle dell'elemento immediatamente precedente, il lantanio (elemento 57). Per analogia la serie fino al 103, comprendente gli elementi transuranici, fu chiamata attinica, da attinio (elemento 89), che precede immediatamente il primo elemento di questa serie (torio).

Gli elementi transuranici

Fino alla fine degli anni cinquanta, gli elementi transuranici venivano scoperti con un ritmo molto elevato, circa un nuovo elemento ogni due anni. Questo ritmo non poteva ovviamente essere mantenuto, poiché ogni passo avanti richiedeva apparecchiature e metodi sempre piú complessi per aumentare il numero di protoni nel nucleo. Contemporaneamente i nuclei prodotti erano sempre meno stabili e quindi piú difficili da riconoscere e osservare. Ciononostante gli elementi sintetici pesanti destano un interesse sempre piú vivo, anche perché i progressi compiuti nella teoria della stabilità nucleare hanno reso possibile ottenere elementi sintetici al di là di qualunque speranza dei primi ricercatori. Contemporaneamente sono stati compiuti grandi progressi

nella preparazione in grandi quantitativi degli elementi sintetici instabili fino al 98, nella conoscenza delle loro proprietà chimiche e nell'individuazione di interessanti applicazioni. Un indice dell'accresciuto interesse per gli elementi sintetici piú pesanti è dato dal fatto che essi non sono piú un campo di ricerca limitato di fatto ai soli ricercatori degli Stati Uniti. Nell'Unione Sovietica, a Dubna, vi è un laboratorio dotato di un ciclotrone, diretto da Georgii N. Flerov, ancor piú grande degli impianti per la sintesi degli elementi pesanti che si trovano al Lawrence Radiation Laboratory dell'Università di California a Berkeley (nel laboratorio di Berkeley sono stati scoperti nove degli undici elementi comunemente noti come transuranici, e ancora oggi esso è il piú importante laboratorio degli Stati Uniti per la ricerca di elementi nuovi). Anche ricercatori di altri paesi hanno portato rilevanti contributi a questa ricerca, in particolare ai suoi aspetti teorici.

Nel 1949 si era arrivati fino al numero atomico 97 (il berchelio), ed era possibile prevedere le posizioni che avrebbero occupato gli elementi successivi fino all'elemento di numero atomico 118, che avrebbe dovuto essere un gas nobile analogo al rado. Nel 1955 veniva riferita la scoperta del mendelevio, l'elemento 101, e nel 1958 veniva annunciato l'isolamento degli elementi 102 (nobelio) e 103 (laurenzio).

In questo articolo, incoraggiati dalle nuove scoperte, presenteremo un sistema periodico di dimensioni forse un po' sorprendenti. In questo sistema (*si veda la figura nella pagina precedente*) è indicata anche la disposizione periodica degli elementi al di là della serie attinica (costituita dagli elementi che vanno dal 90 al 103), fino a quella che noi chiamiamo regione transattinica, costituita dagli elementi successivi al 103. L'aspetto piú sorprendente di questa nuova disposizione è l'aggiunta di un'altra serie di transizione interna, legata alle altre dalla stessa relazione di somiglianza, che va dal numero atomico 122 al numero atomico 153. Chiamiamo questo gruppo di elementi serie superattinica per l'analogia che presenta, in prima approssimazione, con la serie lantanica e la serie attinica, ma diciamo subito che non tutti gli elementi di questa serie sono legati da una relazione di corrispondenza biunivoca con gli elementi della serie attinica o coi lantanidi. Del resto ciò sarebbe impossibile, perché abbiamo supposto che la serie superattinica sia costituita di 32 elementi, mentre le serie lantanica e attinica sono formate di 14 elementi ciascuna. Dopo la serie superattinica, vengono mostrati gli elementi dal 154 al

ELEMENTO 114

ELEMENTO 126

Nel sistema periodico della pagina precedente sono mostrati i 103 elementi naturali e sintetici comunemente noti, insieme alle posizioni ipotetiche per gli elementi fino al 168. I 15 elementi sintetici definitivamente noti sono indicati con rettangoli di colore piú intenso. I rettangoli piú chiari indicano in generale gli elementi sintetici non ancora scoperti, anche se il 104 e il 105 sono già stati ottenuti. La maggior parte degli elementi che si trovano su ciascuna riga orizzontale ha proprietà chimiche diverse, mentre le righe verticali collegano gli elementi con proprietà chimiche simili. Sopra il simbolo di ciascun elemento è indicato il suo numero atomico, cioè il numero di cariche positive del nucleo (o degli elettroni legati a esso). Le parentesi colorate nelle righe orizzontali, contrassegnate con 1*s*, 2*s*, 2*p*, ecc., indicano il riempimento di sottogusci elettronici. Le proprietà chimiche sono determinate prevalentemente dal numero di elettroni nel guscio esterno. Nei disegni schematici di questa pagina sono mostrate le strutture dei gusci elettronici previste per gli elementi superpesanti 114 e 126. Nella terminologia in uso fra coloro che si occupano di raggi X i gusci sono indicati con le lettere da *K* a *R*; nella terminologia della spettroscopia sono indicati con numeri da 1 a 8. I sottogusci, in termini spettroscopici, sono *s*, *p*, *d*, *f* e, per l'elemento 126, anche *g*. Nei sottogusci *s* possono stare al massimo due elettroni (*indicati con palline*), in *p* sei, in *d* dieci, in *f* quattordici e in *g* diciotto. Per ogni sottoguscio è indicato il numero di elettroni. Nella maggior parte degli elementi tutti i gusci interni sono completamente riempiti e via via che cresce il numero atomico si vanno aggiungendo elettroni ai gusci piú esterni. Nei « lantanidi » della serie delle terre rare (dal 57 al 71) il numero di elettroni dei sottogusci 5*d* e 6*s* resta approssimativamente uguale e negli elementi successivi gli elettroni si aggiungono al sottoguscio interno 4*f*. Gli elementi transuranici fino al laurenzio, elemento 103, fanno parte di un altro gruppo di terre rare, gli « attinidi », di cui si va riempiendo il sottoguscio interno 5*f*. Questo sistema presenta per la prima volta una serie « superattinica », che secondo i calcoli dovrebbe andare dall'elemento 122 all'elemento 153, e è formata dal riempimento dei nuovi sottogusci 5*g* e 6*f*.

All'Oak Ridge National Laboratory viene usato un contenitore di acciaio e cemento di 50 tonnellate per trasportare gli elementi sintetici. La fotografia illustra un momento del trasporto del californio prodotto nel reattore del laboratorio dal reattore stesso agli impianti in cui il materiale viene preparato per essere spedito agli utilizzatori. Questo trasportatore può portare un grammo di californio, quantità che, per il californio, può essere considerata una produzione su grande scala.

168, come omologhi degli elementi dal 104 al 108: il 168 occupa quindi la posizione di un gas nobile, anche se sarebbe meglio chiamarlo liquido nobile, dato che sarebbe troppo pesante per poter essere un gas.

Questa estensione ipotetica del sistema periodico degli elementi può sembrare un po' azzardata, ma chi la ritenesse tale tenga presente che vengono oggi compiuti notevoli sforzi per ottenere sperimentalmente l'elemento 114 e gli elementi a esso vicini, e che da circa un anno è in corso una ricerca per trovare in natura l'elemento 110. Tratteremo in seguito questo argomento piú dettagliatamente. Per ora chiediamo al lettore di entrare nell'ordine di idee che il pensare a come potrebbe essere il sistema periodico in regioni finora considerate al di fuori delle possibilità di verifica sperimentale è molto di piú che una mera speculazione teorica.

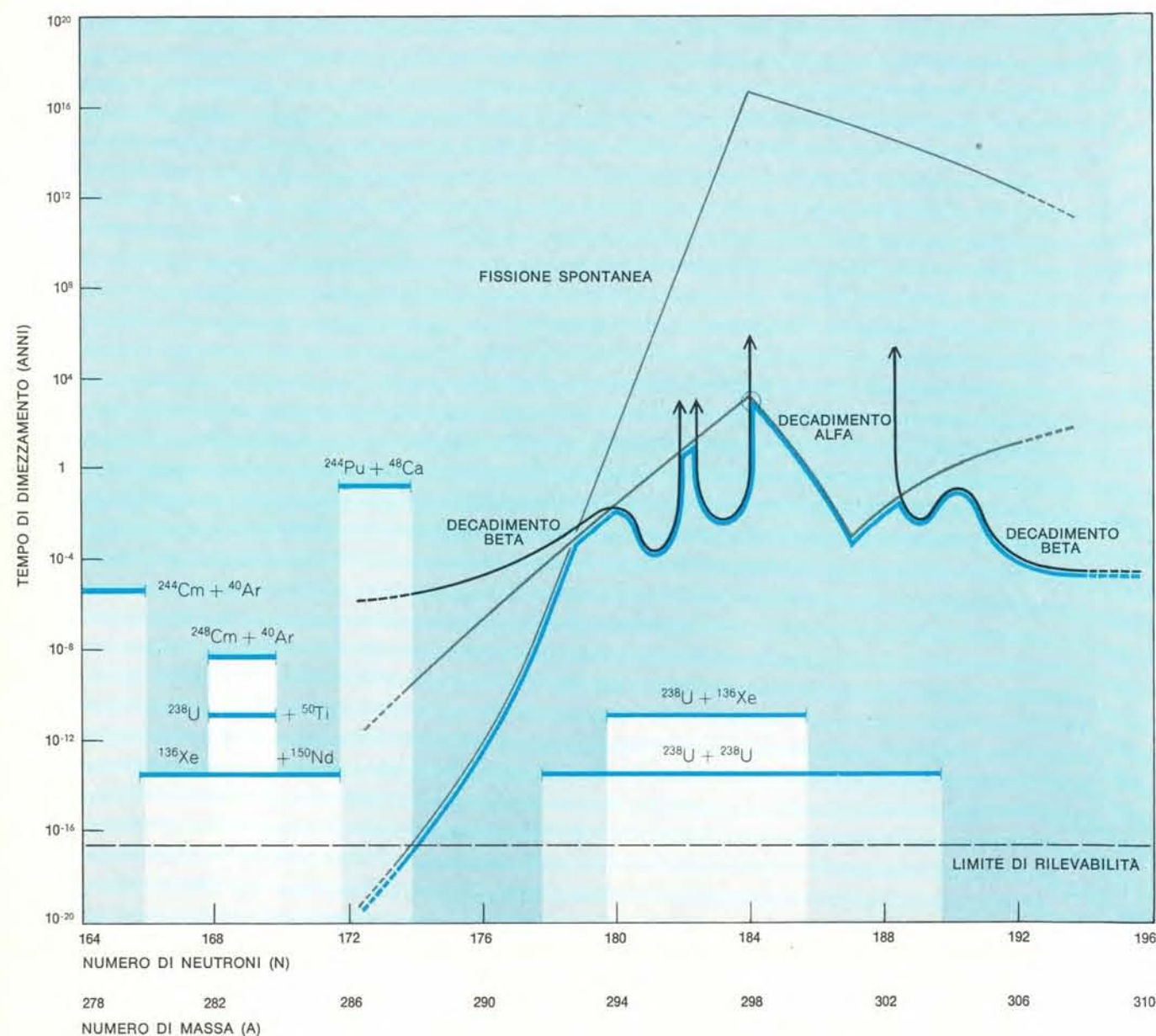
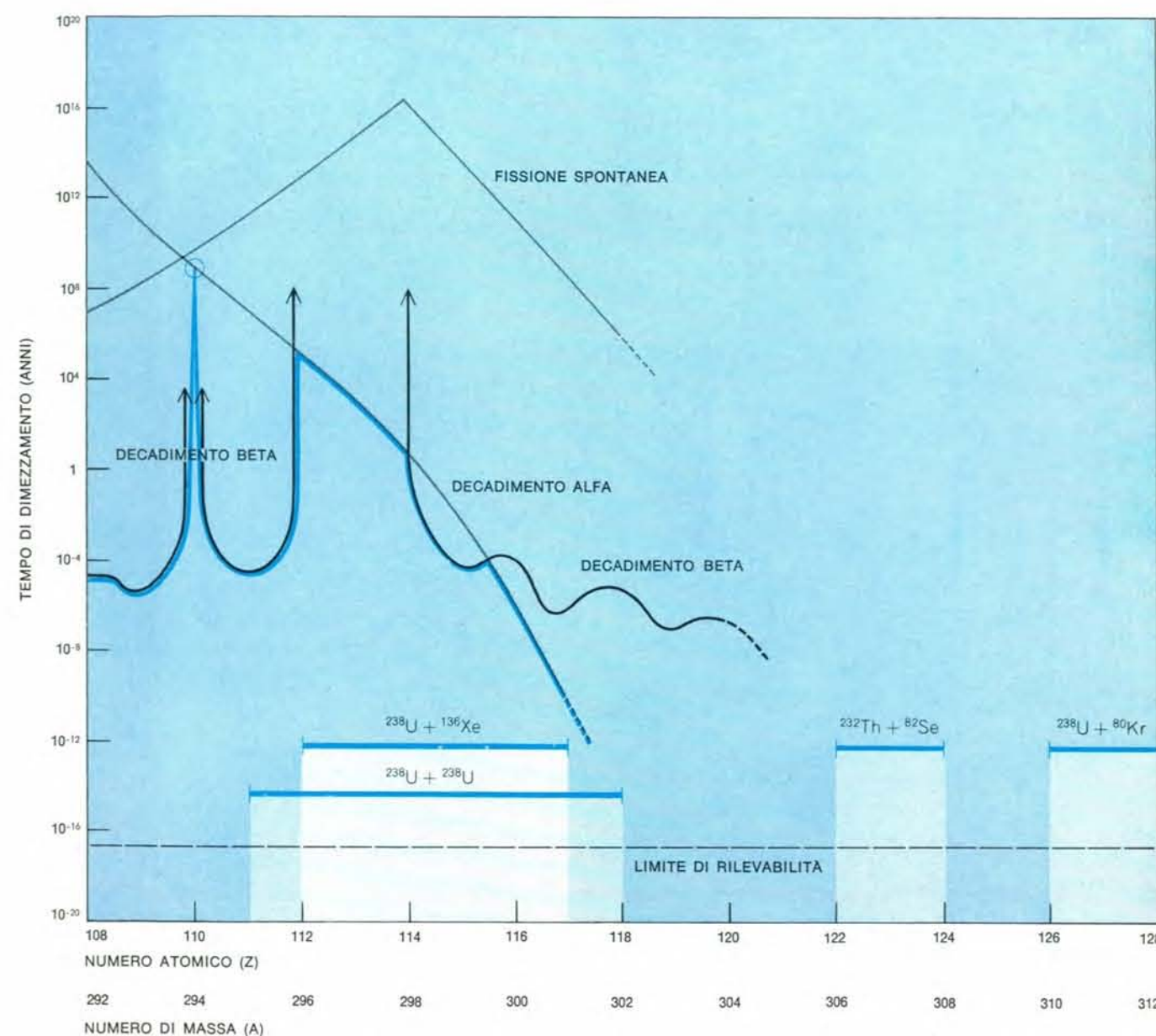
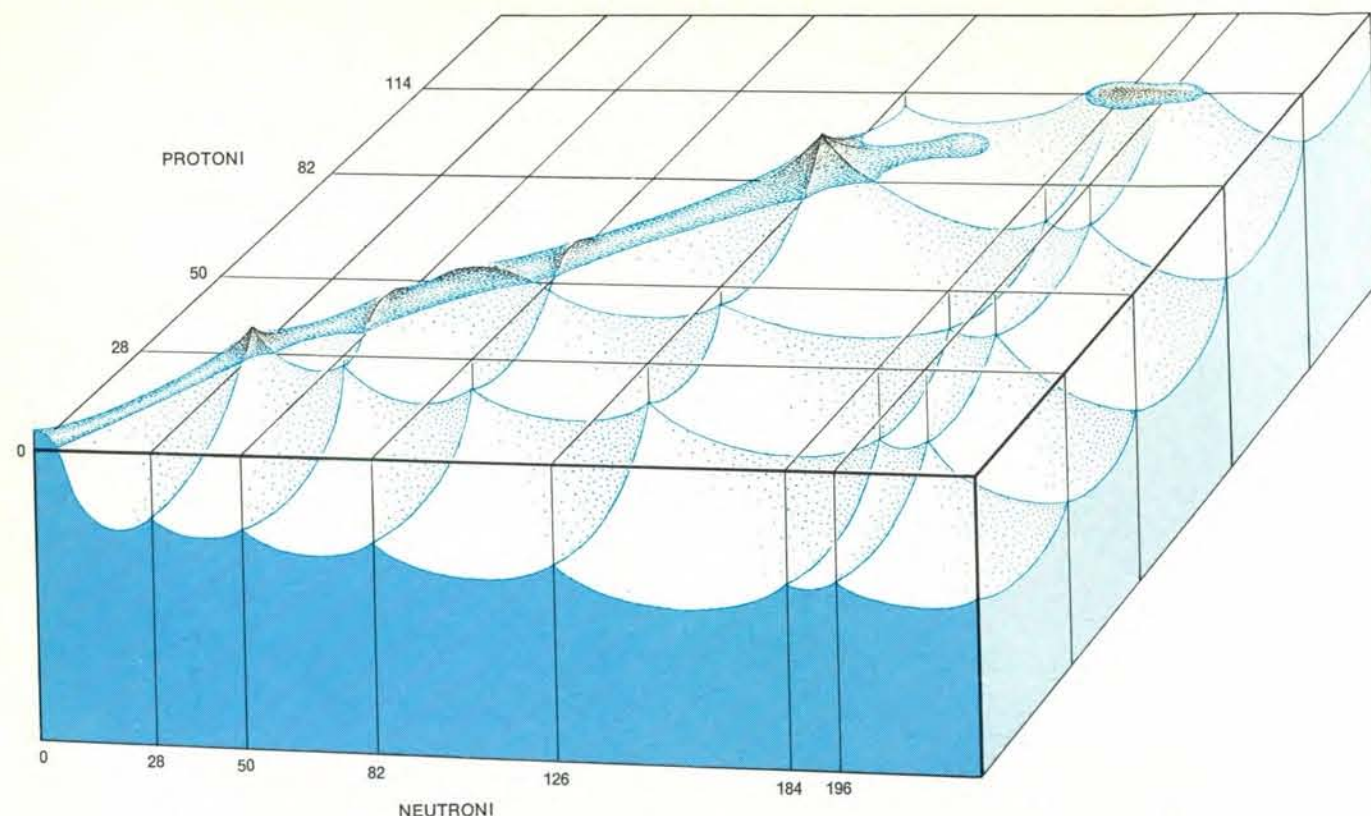
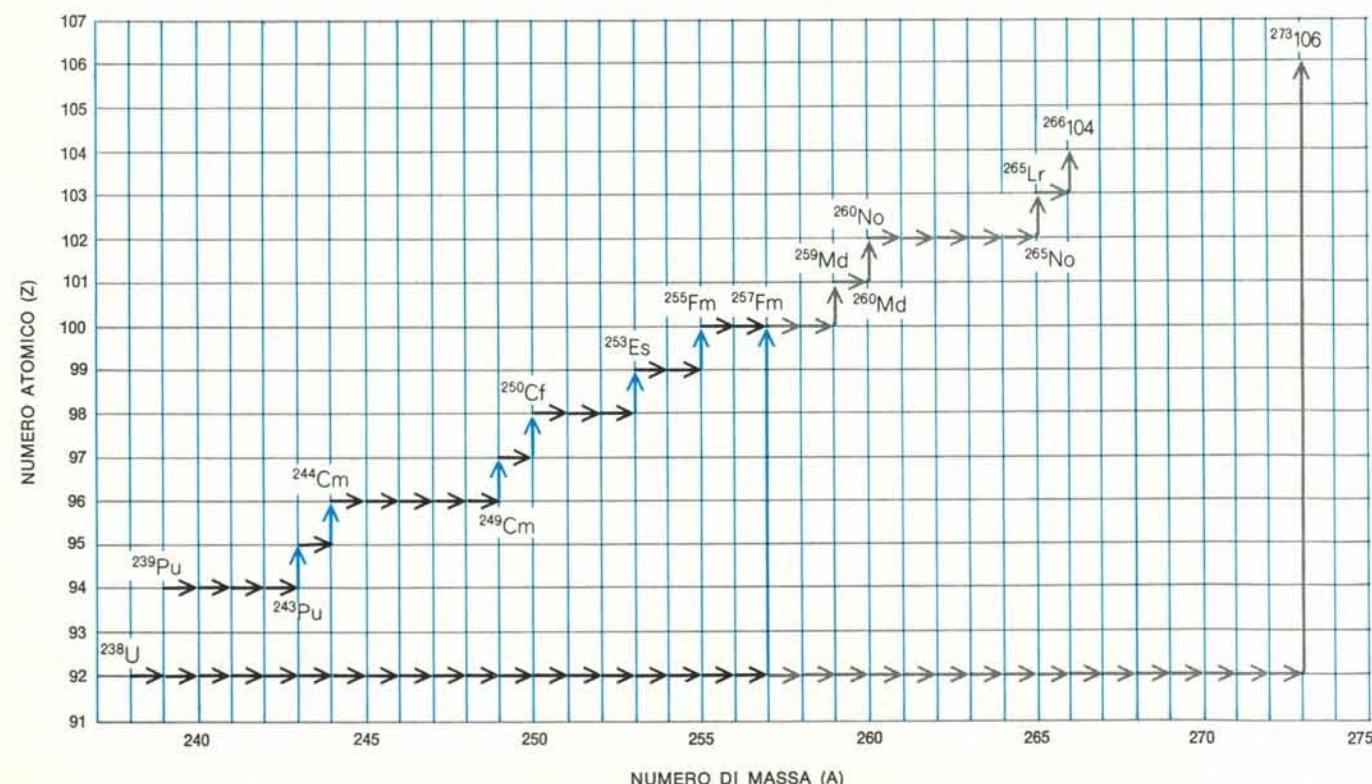
Gli elementi dal 101 al 105

Vorremmo in primo luogo ricordare gli ultimi risultati sperimentali ottenuti per quei pochi elementi di numero atomico immediatamente successivo a 100. Le quantità di questi elementi, anche se la cosa può sembrare incredibile, vengono misurate in termini dei singoli atomi prodotti. L'elemento 101, il mendelevio, fu sintetizzato per la prima volta a Berkeley nel 1955, come isotopo ^{256}Md, sulla base di un-atomo-per-volta! In questi ultimi anni sono stati ottenuti vari isotopi del mendelevio. Tra questi il piú importante è il ^{258}Md, con un tempo di dimezzamento di due mesi, che è sorprendentemente lungo. Di questo isotopo sono stati prodotti 10 000 atomi (che sono da considerarsi una grande quantità), bombardando un isotopo di einsteinio con ioni di elio. È quindi probabile che il mendelevio possa essere prodotto in quantità sufficienti a rendere possibile la misura di qualcuna delle sue proprietà.

Per spiegare alcune delle proprietà chimiche di questo elemento in soluzione acquosa, i chimici del Lawrence Radiation Laboratory hanno utilizzato l'isotopo ^{256}Md, che ha un tempo di dimezzamento di 77 minuti. Sono cosí riusciti ad avere informazioni sullo stato di ossidazione del mendelevio (la maggior parte dei chimici oggi usa il termine « ossidazione » per indicare l'allontanamento a le neutralizzazione degli elettroni di un elemento: « stato di ossidazione » è quindi un termine un po' piú rigoroso per quella che viene anche chiamata la « valenza » di un elemento). I risultati ottenuti indicano che esso, oltre allo stato di ossidazione tripositivo (III) caratteristico della serie attinica, ha anche uno stato di ossidazione dipositivo (II) moderatamente stabile.

L'elemento 102 è stato sintetizzato a Berkeley nel 1958 dal Albert Ghiorso e collaboratori. L'isotopo ^{254}102 è stato identificato mediante l'osservazione e l'identificazione chimica del suo diretto « discendente », l'isotopo del fermio ^{250}Fm, formato per decadimento di una particella alfa. Il tempo di dimezzamento del ^{254}102, valutato allora, risultò essere di circa tre secondi, ma ricerche successive compiute sia a Berkeley sia a Dubna hanno dimostrato che questa breve attività era dovuta a un altro isotopo, il ^{252}102, che era stato prodotto anch'esso negli esperimenti del 1958. Oggi si sa che il tempo di dimezzamento reale del ^{254}102 è di circa un minuto.

Piú importante della soluzione di questi problemi è stata la scoperta,

TEMPO DI DIMEZZAMENTO (ANNI)
10²⁰ 10¹⁶ 10¹² 10⁸ 10⁴ 1 10⁻⁴ 10⁻⁸ 10⁻¹² 10⁻¹⁶ 10⁻²⁰
FISSIONE SPONTANEA
DECADIMENTO ALFA
DECADIMENTO BETA
DECADIMENTO BETA
^{244}Pu + ^{48}Ca
^{244}Cm + ^{40}Ar
^{248}Cm + ^{40}Ar
^{238}U + ^{50}Ti
^{136}Xe + ^{150}Nd
^{238}U + ^{136}Xe
^{238}U + ^{238}U
LIMITE DI RILEVABILITÀ
164 168 172 176 180 184 188 192 196
NUMERO DI NEUTRONI (N)
278 282 286 290 294 298 302 306 310
NUMERO DI MASSA (A)

Rappresentazione in termini di tempi di dimezzamento previsti per tre tipi di decadimento dell'elemento ipotetico 114, che dovrebbe avere una stabilità eccezionale. Il numero atomico 114 è costante; i diversi isotopi sono indicati dal diverso numero di neutroni. Il metodo di controllo del decadimento varia come mostrato dalla curva in colore, in cui è indicato con un cerchio l'isotopo piú stabile, il ^{298}114. I tratti orizzontali, che si riferiscono solo alle scale orizzontali, mostrano il campo di variazione dei numeri di massa che si potrebbero ottenere mediante reazioni nucleari di vario tipo, per esempio bombardando il curio-244 con ioni di argo. La reazione uranio-uranio è quella che sembra offrire le migliori possibilità di raggiungere la regione prevista di grande stabilità centrata intorno al numero di massa 298 e al numero di neutroni 184.

Tempi di dimezzamento previsti per vari elementi superpesanti, individuati mediante il numero atomico in ascissa, aventi numero di neutroni costante e pari a 184, come si vede facendo nei vari casi la differenza tra il numero atomico e il numero di massa. La curva inferiore rappresenta, per ogni numero atomico o numero di massa, il metodo di controllo del decadimento che dà il tempo di dimezzamento piú breve. Il metodo varia nel modo rappresentato dalla curva in colore, in cui è indicato con un cerchio l'isotopo piú stabile, il ^{294}110. I tratti orizzontali, che anche in questa figura, come in quella della pagina a fronte, si riferiscono solo alle scale orizzontali, indicano tipiche reazioni nucleari che potrebbero essere usate per produrre nuclei con 184 neutroni. Solo la reazione uranio-uranio sembra avvicinarsi alla regione di massima stabilità.

Rappresentazione della stabilità nucleare mediante « isole ». Le linee del reticolato indicano i numeri « magici » di protoni o neutroni che danno luogo a stabilità eccezionali. La regione doppiamente magica che si ha per 82 protoni e 126 neutroni è rappresentata da una montagna; una regione che si prevede anch'essa come doppiamente magica ma meno stabile della precedente, e che si ha per 114 protoni e 184 neutroni, è rappresentata da una collina. Le catene di monti rappresentano aree di maggior stabilità dovute a un solo numero magico. Le catene di monti sommersi rappresentano isotopi instabili, che però sono piú stabili di quelli vicini a causa dell'aumento di stabilità prodotto dai gusci chiusi di nucleoni nel nucleo.

Processi di cattura di neutroni che portano alla formazione degli elementi pesanti. Nei reattori ad alto flusso è stata ottenuta la catena dal plutonio-239 al fermio-257; il percorso previsto al di là del ^{257}Fm è indicato in grigio. I tratti verticali rappresentano il decadimento beta, che può aver luogo in diversi punti perché l'elemento bersaglio deve essere irradiato per molto tempo. La catena che parte dell'uranio-238 rappresenta catture di neutroni nell'uranio esposto ai neutroni prodotti in esplosioni nucleari sotterranee. Durante l'irradiazione non può avvenire il decadimento beta, che può invece verificarsi dopo l'esplosione per qualunque numero di massa dell'uranio prodotto come mostrato per il ^{257}U; l'isotopo ^{273}106, che non è ancora stato scoperto ma viene indicato come un possibile prodotto finale, indica che il numero di casi possibili è molto grande.

compiuta a Dubna e a Berkeley, di vari altri isotopi dell'elemento 102. La maggior parte di essi hanno tempi di dimezzamento di piú di tre secondi, e ciò ha consentito ai radiochimici di studiare le proprietà chimiche di questo elemento mediante alcuni esperimenti veramente eccezionali. Per esempio, nel 1967, a Berkeley, usando l'isotopo ^{255}102, che ha un tempo di dimezzamento di tre minuti, Jaromir Maly, Torbjorn Sikkeland, Robert J. Silva e Ghiorso dimostrarono che lo stato di ossidazione (II) dell'elemento 102 è molto stabile in soluzione acquosa. Questo comportamento indica che lo stato di ossidazione (II) diventa sempre piú stabile man mano che ci si avvicina alla fine della serie attinica, cosí come avviene per l'elemento omologo della serie dei lantanidi, l'itterbio (elemento 70). Questo comportamento era stato previsto circa 20 anni fa. Si deve tuttavia notare che il fatto che lo stato di ossidazione (II) possa essere facilmente ridotto, l'osservazione dello stato di ossidazione (II) nel mendelevio e recenti indicazioni che lo stato di ossidazione (II) può essere osservato nella serie attinica già nel californio (elemento 98), sono tutti dati che indicano come la stabilità dello stato (II) sia maggiore negli elementi pesanti della serie attinica che nei lantanidi.

L'onore di dare il nome a un nuovo elemento di solito va al suo scopritore. Nel 1957, un gruppo di ricercatori dell'Istituto di fisica di Stoccolma credette di aver scoperto l'elemento 102, e propose di chiamare « nobelio » (simbolo No) il nuovo elemento. La proposta venne accolta, ma ben presto ci si accorse che la scoperta era solo presunta, non reale. Ciononostante, nel 1967, il gruppo di Berkeley che aveva scoperto veramente l'elemento 102 nel 1958 rinunciò al suo diritto di dare il nome all'elemento e propose che fosse accettato il nome nobelio.

La scoperta, avvenuta a Berkeley nel 1961, del laurenzio, elemento 103, in forma di una radioattività di otto secondi (^{257}Lr, ^{258}Lr o ^{259}Lr) fu seguita dalla scoperta, avvenuta a Dubna nel 1965, di un isotopo del laurenzio, il ^{256}Lr, con tempo di dimezzamento piú lungo, pari a 35 secondi. In una serie di sensazionali esperimenti compiuti l'anno scorso a Berkeley, Ghiorso e i suoi collaboratori riuscirono, usando alcuni atomi di questo isotopo (circa cinque per volta) a spiegare il comportamento di ossidazione del laurenzio. La tecnica da essi usata era quella della estrazione con solventi: operando con estrema rapidità e destrezza, essi estrassero gli ioni del laurenzio da una soluzione acquosa tampone in un solvente organico, portando a termine ciascuna estrazione in circa 30 secondi. Essi scoprirono che il laurenzio si comporta in modo diverso dal nobelio dipositivo e in modo piú simile a quello dei primi elementi tripositivi della serie attinica, come è dimostrato dal fatto che gli ioni tripositivi si separano dalla fase organica mentre gli ioni dipositivi no. Questo comportamento era già stato previsto.

Sia a Dubna sia a Berkeley sono stati fatti dei tentativi per scoprire gli elementi 104 e 105. Nel 1964 Flerov e i suoi collaboratori pubblicarono i risultati ottenuti bombardando il plutonio-252 con ioni di neo per dare inizio a una reazione nucleare che si riteneva dovesse produrre un isotopo dell'elemento 104, e precisamente il ^{260}104. Il tempo di dimezzamento di questo isotopo è stato misurato in circa 0,3 secondi. Inoltre esso decade solo per fissione spontanea, che è un processo indeterminato che non caratterizza un isotopo con un'energia esattamente misurabile, e quindi precisamente identificante, come nel decadimento per emissione di una particella alfa. Nel 1966 Ivo Zvara e i suoi collaboratori del gruppo russo riferirono i risultati di esperimenti volti a separare l'isotopo con tempo di dimezzamento di 0,3 secondi dalle altre sostanze presenti, mediante una tecnica basata sull'ipotesi che l'elemento 104 sarebbe il primo elemento transattinico e quindi avrebbe proprietà simili a quelle dell'afnio, sotto il quale sarebbe nel sistema periodico. I ricercatori russi pensavano di essere riusciti nel loro intento, ma questo non si può ancora affermare con certezza date le numerose interpretazioni che si possono dare dei risultati ottenuti. Anche i ricercatori di Berkeley non sono riusciti a verificare i risultati conseguiti dai russi. Essi hanno però recentemente verificato che una delle attività formatesi nel bombardamento del californio-249 con ioni carbonio è il ^{257}104, che annette particelle alfa e ha un tempo di dimezzamento di circa tre secondi, il cui « discendente » è stato identificato come il già noto isotopo nobelio-253. Cosí il ^{257}104 è il primo isotopo dell'elemento 104 con proprietà completamente note.

Piú incerti sono i risultati delle ricerche sull'elemento 105 compiute nell'Unione Sovietica. Dopo aver bombardato l'americio-243 con ioni di neo, essi scoprirono due emettitori di particelle alfa con tempi di dimezzamento inferiori a tre secondi, che pensarono di poter identificare come ^{260}105 e ^{261}105. Anche in questo caso Ghiorso e il suo gruppo non sono riusciti a ottenere una conferma dei risultati ottenuti dai russi. Una misura delle difficoltà incontrate in questo tipo di ricerca è data dal fatto che il ciclotrone di Dubna produce solo un atomo ogni 20 ore di bombardamento.

Elementi superpesanti

Proseguendo nelle considerazioni che rendono possibile identificare gli elementi con numero atomico molto maggiore di 100, passiamo brevemente in rassegna le teorie della struttura nucleare (diversa dalla struttura elettronica) che hanno fatto pensare con ottimismo alla possibilità di scoprire gli elementi superpesanti. La storia cominciò circa vent'anni fa, quando Maria Göppert Mayer dell'Università di Chicago e O. P.L. Haxel, J. Hans D. Jensen e Hans E. Suess dell'Università di Heidelberg cominciarono a sviluppare un modello a « gusci » del nucleo, costituito da particelle che si muovono in un campo di forze nucleari. Si dimostrò che l'insieme delle particelle (protoni e neutroni) è particolarmente stabile quando il nucleo contiene un numero « magico » di protoni e neutroni. La struttura stabile può essere considerata come un insieme di gusci, o orbite sferiche, completi, che non possono cioè contenere altre particelle nucleari; questa struttura è analoga a quella dei gusci elettronici completi dei gas nobili. I numeri magici di neutroni (N) o protoni (Z) comunemente noti sono 2, 8, 20, 28, 50 e 82 per gli elementi che precedono l'uranio nel sistema periodico. In questa regione vale anche il numero magico $N = 126$, come è dimostrato dall'elevata stabilità del piombo-208 ($^{208}_{82}$Pb, o anche $Z = 82$ e $N = 126$) che ha un nucleo doppiamente magico. Mediante la teoria dei gusci si è arrivati, passano attraverso vari stadi, a poter calcolare il potenziale dei singoli nucleoni (protoni o neutroni) in un campo deformato (non sferico), usando il metodo degli « orbitali di Nilsson », sviluppato appunto dal fisico svedese Sven Gösta Nilsson.

Un'altra ipotesi teorica che ha contribuito a spiegare alcuni fenomeni è quella del modello « a goccia » del nucleo, proposta per la prima volta da Niels Bohr e John A. Wheeler. In questo modello si fa l'ipotesi che un nucleo stabile abbia una forma sferica, o a goccia, prodotta dall'azione risultante della tensione superficiale, diretta verso l'interno, e della forza di repulsione tra i protoni carichi positivamente, diretta verso l'esterno. Uno sviluppo di questo modello è risultato molto utile per pre-

vedere la stabilità dei nuclei pesanti rispetto alla fissione spontanea e ad altre forme di decadimento. Nell'estensione del modello a goccia formulata a W.D. Myers e W.J. Swiatecki del Lawrence Radiation Laboratory, l'energia potenziale del nucleo è una funzione del numero di neutroni, del numero atomico e della forma del nucleo. I nuclei della maggior parte degli isotopi, compresi quelli dei lantanidi e degli elementi della serie attinica, non sono perfettamente sferici, per esempio possono essere ellissoidali, mentre i nuclei degli isotopi i cui gusci sono completi o quasi completi sono sferici. Se non vi fossero gusci completi tutti gli elementi superpesanti decadrebbero istantaneamente per fissione spontanea in isotopi con numero atomico medio situato verso la metà del sistema periodico.

Calcoli molto interessanti sviluppati in questi ultimi anni da Nilsson, Swiatecki, V.M. Strutinskii e altri ricercatori di vari paesi (che hanno usato il modello a goccia, il metodo degli orbitali di Nilsson e altri modelli derivati da quelli noti nelle regioni lantanica e attinica) stabiliscono la possibilità di esistenza di gusci nucleari chiusi nella regione degli elementi superpesanti. La resistenza al decadimento per fissione spontanea di questi nuclei significa che diventa rilevante la velocità di decadimento per emissione di particelle alfa e beta. Stime di stabilità per queste forme di decadimento sono state fatte a Berkeley da Nilsson e dal suo collaboratore Chi Fu Tsang.

Questi calcoli teorici fanno pensare all'esistenza di gusci nucleonici chiusi per $Z = 114$ e $N = 184$, che molto difficilmente decadono per fissione spontanea. Fortunatamente il nucleo con 114 protoni e 184 neutroni ($^{298}114$) è molto stabile, non decade per emissione di particelle beta e è doppiamente magico come il piombo-208. Un guscio chiuso meno stabile dovrebbe esistere, secondo i calcoli teorici, per $Z = 126$ (o $Z = 124$), ma le scoperte più recenti fanno ritenere che ciò non sia probabile. Piú promettenti sono i calcoli di Tsang che indicano un guscio chiuso per $N = 196$. Anche se un nucleo con $Z = 164$ può rappresentare un ipotetico punto di stabilità, questa possibilità non è ancora stata esaminata a fondo.

Il reattore nucleare dell'Oak Ridge National Laboratory produce elementi pesanti della serie attinica fino al fermio compreso. Il recipiente a pressione del reattore è situato nella piscina in alto. In basso si trova la piscina di immagazzinaggio in cui i nuclei irradiati nel reattore vengono tenuti fino a quando si raffreddano. Il bagliore, riportato anche sulla copertina di questo numero, è quello prodotto dai cori per radiazione Cerenkov. In alto a destra è situato un recipiente di trasporto usato per trasferire le sostanze radioattive. Il complesso di questo impianto costituisce il reattore ad alto flusso.

La probabilità di poter effettivamente realizzare la sintesi e l'identificazione dei nuclei superpesanti è accresciuta dal fatto che il nucleo doppiamente magico $^{298}114$ si trova al centro di un'isola di stabilità piuttosto vasta situata in un mare di fissione spontanea (*si veda la figura in alto a pagina 54*). La resistenza al decadimento per fissione spontanea è piú alta al centro dell'isola, e va diminuendo via via che ci si allontana da esso. Nelle figure alle pagine 50 e 51 sono mostrati gli andamenti previsti da Nilsson, Tsang, Swiatecki e altri, dei tempi di dimezzamento per fissione spontanea, decadimento alfa e decadimento beta in questa regione. Forse i numeri sono completamente sbagliati, ma anche se i valori veri fossero molto piú bassi dovrebbero tuttavia essere osservabili tutti i nuclei con numero atomico e numero di massa appropriati. Per esempio, il nucleo doppiamente magico $^{298}114$ dovrebbe avere un tempo di dimezzamento per fissione spontanea di 10^{16} anni, un tempo di dimezzamento per decadimento alfa di 1000 anni, e non dovrebbe subire decadimento beta. I tempi di dimezzamento dell'ordine dei nanosecondi (miliardesimi di secondo) possono essere misurati con gli strumenti oggi usati per rivelare nuovi elementi, e ciò comporta un largo margine di errore nella scelta, effettuata in base a calcoli teorici, di una regione da studiare sperimentalmente.

Secondo le previsioni teoriche si dovrebbe avere il massimo di stabilità per 110 protoni e 184 neutroni ($^{294}110$). Questo isotopo potrebbe avere un tempo di dimezzamento di cento milioni di anni sia per fissione spontanea sia per emissione di particelle alfa, e potrebbe non decadere per emissione di particelle beta. Un tempo di dimezzamento di alcune centinaia di milioni di anni sarebbe sufficiente per permettere a un isotopo di sopravvivere e anche di esistere ancora oggi in natura (come avviene per l'uranio-235, che ha un tempo di dimezzamento di 700 milioni di anni), sempre che sia stato uno dei prodotti delle reazioni nucleari cosmiche che hanno portato alla creazione del sistema solare. Il sistema periodico indica che l'elemento 110 è omologo del platino e dovrebbe quindi avere proprietà simili a quelle di questo prezioso metallo. Per questo motivo in numerosi laboratori sono state compiute varie ricerche dell'elemento 110, e di quelli vicini, nel platino esistente in natura e in altri metalli e minerali.

Il complesso che costituisce il core del reattore ad alto flusso per isotopi comprende 31 « pacchetti bersaglio » (*al centro*) che vengono caricati con le sostanze che devono essere bombardate. Un carico standard è costituito da 300 grammi di plutonio-242. Tutto il gruppo di combustibile contiene un totale di 9,4 chilogrammi di uranio-235. La parte esterna contiene 369 piastre curve e ha un diametro di circa 44 centimetri.

La sintesi degli elementi superpesanti

Vi sono numerose ragioni per ritenere che gli elementi superpesanti possano essere creati solo bombardando nuclei bersaglio con proiettili sufficientemente energetici costituiti da ioni pesanti. Molte sono le difficoltà sperimentali che dovranno essere superate. Si prevede che la produzione dei nuclei voluti sarà molto piccola a causa della enorme quantità di reazioni nucleari che danno luogo piú alla fissione che alla sintesi per amalgamazione del proiettile e del nucleo bersaglio. Mediante i nuclei bersaglio e i proiettili di cui si può di solito disporre si possono ottenere solo nuclei deficienti di neutroni, che non sono nell'isola di stabilità. Entro breve tempo si dovrebbe poter disporre di ioni proiettili con sufficiente energia e con questi si riuscirà forse a ottenere nuclei appena dentro l'isola di stabilità e quindi ancora con tempi di dimezzamento cosí brevi da rendere molto difficile rivelarli. Per raggiungere il centro dell'isola sono necessari ioni pesanti ed energetici e ciò può rendere necessaria la costruzione di nuovi acceleratori o la modificazione di quelli esistenti.

Una reazione relativamente facile da produrre è quella che implica il bombardamento di un isotopo del curio ($^{248}_{96}Cm$) con ioni di argo ($^{40}_{18}Ar$) per ottenere il $^{284}114$ (il numero di massa 284 è solo indicativo, dato che ci si può aspettare un numero di massa variabile tra 282 e 284 al variare del numero dei neutroni emessi). Già oggi si può disporre di curio bersaglio e di argo proiettile con l'energia e l'intensità richieste. Si raggiunge cosí il numero atomico 114, come si voleva, ma il numero di neutroni è solo 170 ($284 - 114 = 170$) e quindi questo nucleo dovrebbe trovarsi nel mare della fissione spontanea ed es-

sere perciò inosservabile. Questa reazione è stata tentata a Berkeley, ma non si è trovato alcun prodotto identificabile.

È quindi necessario un nucleo con piú neutroni. Un esempio di reazione tra le migliori che si potranno ottenere in futuro è quella in cui un isotopo di plutonio ($^{244}_{98}Pu$) viene bombardato con ioni di calcio ($^{48}_{20}Ca$) per produrre il $^{288}114$, che è un nucleo con 174 neutroni e quindi è ai margini della prevista isola di stabilità. In questa reazione vengono usati elementi abbastanza ricchi di neutroni. L'isotopo ^{244}Pu è relativamente raro, ma sarà presto disponibile in grandi quantità come prodotto dell'intensa irradiazione con neutroni del ^{239}Pu. L'isotopo proiettile, il ^{48}Ca, presenta altri problemi: esso esiste in natura in misura inferiore allo 0,2 % degli isotopi del calcio, cosicché saranno necessari processi di arricchimento per averne quantità maggiori. Inoltre è difficile da vaporizzare e ionizzare. Altri isotopi ricchi di neutroni che possono essere utilizzabili come proiettili sono il nichel-64 e il titanio-50, ma anch'essi presentano gli stessi problemi del calcio-48. Flerov ha tentato di formare l'elemento 114 bombardando isotopi di uranio e di plutonio con ^{50}Ti, ma non ha avuto successo. Il problema piú difficile da risolvere è che sembra impossibile arrivare al centro dell'isola, o almeno vicino a esso, per mezzo di reazioni che usano un bersaglio costituito da un elemento pesante e ioni accelerati moderatamente pesanti.

Forse, il solo modo di assicurarsi il rapporto di neutroni e protoni necessario per ottenere il $^{298}114$ e altri prodotti sarà quello di usare nuclei bersaglio come l'uranio-238 ($^{238}_{92}U$), ricchissimo di neutroni, e ioni proiettili di elementi come l'uranio e lo xeno. Forse, infatti, se si potesse produrre un nucleo instabile, eccitato, per mezzo dell'interazione o fusione di uno ione uranio con l'uranio (forse questa è la migliore reazione che si possa tentare) o di uno ione xeno con l'uranio, esso decadrebbe subito per fissione in prodotti relativamente stabili. Per compiere la reazione uranio-uranio sarebbero necessari ioni uranio accelerati a circa 1,5 miliardi di elettronvolt. Ogni ione deve possedere numerose cariche, ottenute per allontanamento degli elettroni orbitali, per poter essere accelerato in una macchina di dimensioni ragionevoli. Né negli Stati Uniti né in Unione Sovietica esistono macchine capaci di accelerare ioni cosí pesanti a energie sufficientemente elevate, ma tali macchine possono essere costruite, oppure si possono modificare quelle già esistenti, quasi senza alcun limite per il numero atomico degli ioni accelerati.

Proprietà chimiche

Finora ci siamo soffermati sulla costituzione nucleare degli elementi superpesanti. Tuttavia le proprietà chimiche di un elemento dipendono quasi completamente dalla disposizione degli elettroni esternamente al nucleo. Negli elementi transuranici noti o previsti fino a oggi, gli elettroni sono disposti in 7 gusci, numerati da 1 a 7 a partire dal nucleo andando verso l'esterno. I gusci sono ulteriormente suddivisi in sottogusci, indicati con *s*, *p*, *d* e *f*. Negli elementi superpesanti vengono introdotti per la prima volta un guscio 8 e un sottoguscio *g* (*si veda la figura a destra a pagina 48*).

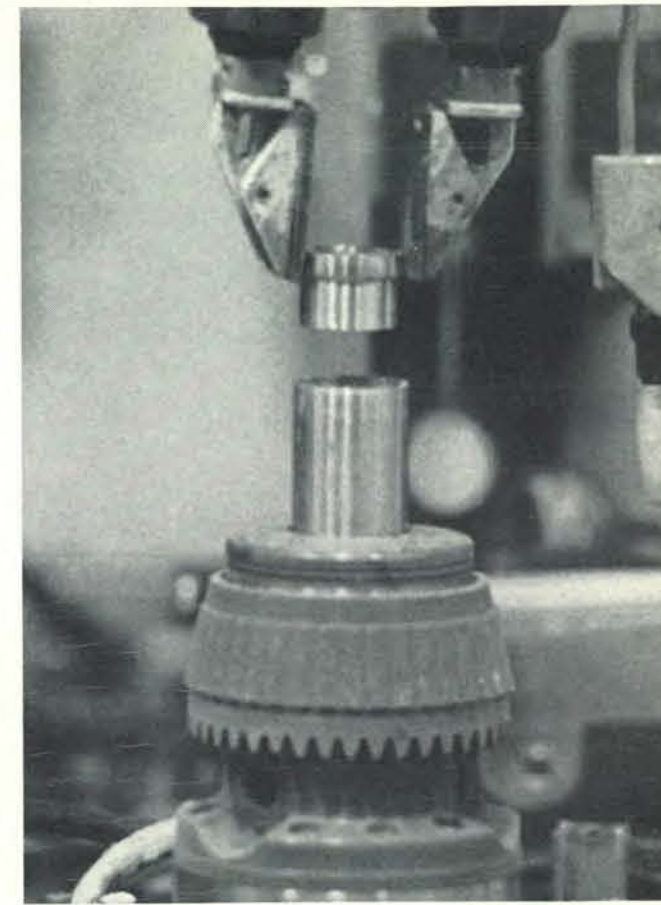
Ora che abbiamo illustrato i motivi del nostro ottimismo sulla possibilità di ottenere gli elementi superpesanti, dobbiamo ancora spiegare le ragioni per cui abbiamo attribuito a essi dei posti precisi nel sistema periodico, che permettono di prevedere le loro proprietà chimiche. Dall'osservazione del sistema periodico si può dedurre che la serie dei lantanidi, dal cerio al lutezio, è una serie di transizione formata per riempimento successivo di un sottoguscio elettronico interno con 14 posti, il 4*f*. Questo è il motivo per cui le proprietà chimiche dei lantanidi sono simili. Analogamente, la serie attinica è formata dal riempimento del sottoguscio interno 5*f*. Ciascun elemento di questa serie ha proprietà in parte simili a quelle dell'elemento omologo della serie dei lantanidi. La serie attinica di 14 elementi termina con l'elemento 103.

Benché ciò richieda calcoli estremamente lunghi e complessi, è possibile prevedere in linea di principio la struttura elettronica degli elementi della serie attinica e di quelli della serie transattinica non ancora scoperti. Oggi i calcolatori hanno reso possibili questi calcoli, che sono stati fatti al Los Alamos Scientific Laboratory per gli elementi con numero atomico fino a 132. Questi calcoli mostrano che gli elementi dal 104 al 112 si formano per riempimento del sottoguscio 6*d*, e hanno quindi proprietà chimiche simili a quelle degli elementi dall'afnio al mercurio. Gli elementi dal 113 al 118 sono formati dal riempimento del sottoguscio 7*p*, e quindi sono simili agli elementi dal tallio al rado. È interessante notare che l'elemento 114, che abbiamo nominato cosí spesso, risulta omologo del piombo, che è molto stabile; esso può quindi essere chiamato « ekapiombo », secondo la terminologia usata da Mendeleev, l'ideatore del sistema periodico, per indicare un elemento di una colonna, o gruppo, non ancora scoperto, che dovrebbe avere proprietà simili a quelle degli elementi del gruppo che lo precedono. L'elemento 119 dovrebbe essere un metallo alcalino e il 121 dovrebbe avere proprietà simili a quelle dell'attinio e del tantalio.

Già da alcuni anni uno di noi (Seaborg), il chimico russo Vitalii I. Goldanskii, e altri pensano che un'altra serie di transizione interna debba iniziare in prossimità dell'elemento 120. La teoria quantistica indicava che questa serie avrebbe dovuto formarsi per aggiunta di 18 elettroni al sottoguscio interno 5*g*, oppure di 14 elettroni al sottoguscio 6*f*, ma non si riuscí a prevedere l'ordine esatto di riempimento finché non si poterono utilizzare i calcolatori di Los Alamos. Oggi questi calcoli fanno pensare che, dopo l'aggiunta di alcuni elettroni ai sottogusci 7*d* e 6*f*, avvenga secondo le solite regole il riempimento di 5*g*. Ci si può ragionevolmente aspettare che questo sia poi seguito dal riempimento del sottoguscio interno 6*f*, che porterebbe alla formazione di una serie di transizione interna costituita di 32 elementi, fino al 153. I numeri piú bassi di questa serie, probabilmente fino al 124, potrebbero essere in generale omologhi a quelli della serie attinica. Non sarebbe però ben chiara la correlazione tra gli elementi di questa serie, anche se lo stato di ossidazione tripositivo (III) potrebbe esserne una caratteristica distintiva. Dato che la differenza tra i livelli energetici di elettroni successivi è molto piccola, questa serie di elementi superattinici avrebbe stati di ossidazione multipli, appena distinguibili tra loro, e questo porterebbe a una chimica complicata.

Dopo il completamento della serie superattinica, l'aggiunta di elettroni nei posti liberi restanti del sottoguscio 7*d* darebbe luogo agli elementi dal 154 al 162 (o anche da eka-104 a eka-112). Riempiendo con 6 elettroni il guscio 8*p* si avrebbero gli elementi dal 163 al 168. Si noti che l'elemento 164, che è un possibile punto di stabilità nucleare, sarebbe un eka-114 o eka-ekapiombo. Quindi i centri di stabilità nucleare – conosciuti o previsti – stagno (50), piombo (82), elemento 114 ed elemento 164, appartengono alla stessa colonna o gruppo del sistema periodico. Questa è una strana affinità, perché i principi che determinano la stabilità nucleare non hanno alcuna relazione apparente con quelli che determinano la struttura elettronica, da cui dipende la posizione di un elemento nel sistema periodico.

Se gli elementi superpesanti potranno essere prodotti, e saranno stabili come indicano le previsioni, per ottenere prove della loro esistenza sarà necessario usare sia tecniche chimiche sia metodi di rivelazione nucleare. I metodi di separazione chimica dovranno essere preparati in base alla conoscenza delle proprietà chimiche degli elementi cercati e quindi potrà diventare assolutamente necessario sapere quali sono le proprietà previste (del tipo di quelle che abbiamo descritto in questo articolo).

Dentro una cella nell'impianto per elementi transuranici una mano meccanica mette un cilindro, usato per spedire il curio, dentro una saldatrice (*a sinistra*). Dopo che il curio, in una quantità di circa cinque grammi per ogni spedizione, è stato messo nel cilindro, su questo viene applicato un coperchio (*a destra*), che viene poi saldato elettricamente. Dopo essere stato cosí preparato, il cilindro contenente il curio radioattivo viene calato in una massiccia struttura schermante per essere spedito.

Alcune applicazioni

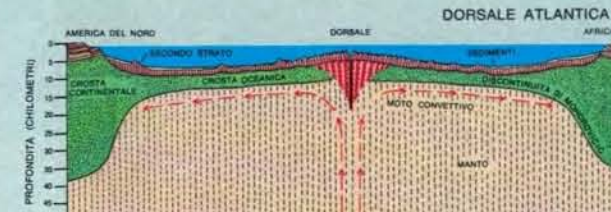
Benché il motivo principale che ha determinato i tentativi di produrre gli elementi pesanti noti e di sintetizzarne dei nuovi sia quello di ampliare la conoscenza delle leggi fondamentali della natura, la ricerca ha portato anche all'individuazione di applicazioni pratiche degli elementi pesanti in una misura del tutto inaspettata. Oltre alla ben nota utilizzazione del plutonio come sorgente di energia negli esplosivi e nei reattori nucleari, oggi si comincia a usare anche altri isotopi della serie attinica. Per esempio, l'isotopo plutonio-238, che emette particelle alfa e si ottiene irradiando con neutroni il nettunio-237 (che viene ottenuto come sottoprodotto nel funzionamento dei reattori di potenza) viene prodotto in grandi quantità degli Stati Uniti per essere usato come sorgente di calore nei generatori ausiliari, soprattutto nei satelliti e nelle sonde spaziali. In futuro questo isotopo potrà essere utilizzato come sorgente di energia per far battere meccanicamente il cuore e forse, infine, anche i cuori artificiali trapiantati. Nei prossimi 20 o 30 anni le richieste di plutonio-238 potranno ammontare a varie tonnellate. Anche l'isotopo curio-244 può essere molto usato nelle missioni spaziali.

Una delle piú notevoli applicazioni degli elementi pesanti si ebbe nel 1967, quando la sonda spaziale Surveyor V atterrò sulla Luna e compí un'analisi chimica, basata sulla diffusione delle particelle alfa, della superficie lunare. In questa analisi veniva usato, come sorgente di particelle alfa, il curio-242. Per l'apparecchiatura di rivelazione furono impiegate come standard di energia particelle alfa generate da una piccola quantità di einstenio-254.

L'isotopo americio-241, formato per decadimento beta del plutonio-241 presente nel plutonio prodotto nei reattori, è disponibile in quantità dell'ordine del chilogrammo e viene usato in moltissime applicazioni, che vanno dagli strumenti per la misura della densità dei fluidi agli indicatori di livello del combustibile e dell'olio sugli aerei, dai misuratori di spessore ai dispositivi telecomandati. In tutte queste apparecchiature vengono usati i raggi gamma emessi durante il processo di decadimento degli isotopi. L'isotopo californio-252, che è la sorgente di neutroni piú intensa oggi conosciuta, sarà presto disponibile in grandi quantitativi e potrà essere usato in campi come la radioterapia del cancro, la radiografia con neutroni e l'analisi per attivazione neutronica.

Il numero monografico 1969 di **Scientific American** sarà integralmente riprodotto nel numero speciale di dicembre di **Le Scienze** con l'aggiunta di due articoli italiani, di cui indicheremo prossimamente autore e titolo.
Coloro che si abbonano a **Le Scienze** entro novembre riceveranno questo numero speciale doppio, senza alcun onere supplementare.

L'oceano, un insieme unico e collegato che abbraccia il 71 % della superficie terrestre, è l'argomento del numero monografico del 1969 di Scientific American *e del primo numero speciale di dicembre 1969 di* Le Scienze. *Soltanto in questi ultimi anni è stata rivelata la grande dorsale medioocеanica. Con il 95 % del fondo marino ancora inesplorato, questa scoperta è la chiave di una teoria geologica generale che spiega la creazione dei continenti e rinverdisce il concetto di deriva dei continenti.*

I vari complessi andamenti delle Correnti e delle temperature oceaniche si riuniscono in un tutto ininterrotto che collega l'interno della Terra con il fondo marino, con i limiti estremi dell'atmosfera e, infine, con il sistema solare. Anche le province biotiche oceaniche sono collegate al flusso delle correnti e delle temperature marine. L'abbondanza della pesca dipende essenzialmente dal movimento e dalla trasformazione costante della vita planctonica, cioè delle microscopiche alghe monocellulari e degli animaletti che se ne cibano. La Fossa delle Tonga scende a 10625 metri sotto il Pacifico sud orientale, è lunga 14 km e larga 55 km. In queste profonde fosse oceaniche i materiali di superficie tornano nelle profondità della Terra nelle zone di scivolamento sismico, cioè nei punti in cui il fondo marino s'inabissa al di sotto dei continenti « in galleggiamento ». Il materiale ad alta temperatura risale dal manto terrestre verso la dorsale, accostandosi ai continenti con un movimento di espansione. La conseguente espansione del fondo oceanico spiega la direzione e la velocità della deriva dei continenti.

ARTICOLI

L'uomo e il mare
L'articolo prende in considerazione addirittura il ritorno dell'uomo al suo habitat originario, l'oceano, dove vennero innescati più di tre miliardi di anni fa i processi biologici della vita terrestre.

La storia del mare
Le acque dell'oceano, come l'atmosfera terrestre, si sono accumulate sgorgando lentamente dalle viscere della Terra, a partire da quando il denso magma primordiale, quattro miliardi di anni fa, cominciò ad agitarsi.

L'aria e il mare
L'oceano è la sede primaria dello scambio tra la Terra e il Sole: per comprendere i fenomeni metereologici è necessario cartografare in modo globale i particolari di questa interazione.

Il movimento dei mari
Le grandi correnti oceaniche si muovono seguendo una rete complessa di andamenti circolari, o « giri », determinati in massima parte dal vento, ma anche dalla forza delle maree e dalla rotazione terrestre.

Le piattaforme continentali
Da qualche decina di chilometri fino a cinquecento chilometri al largo dei continenti si stendono milioni di chilometri quadrati di formazioni prevalentemente sedimentarie, vasto deposito di idrocarburi per il futuro.

L'abissale fondo marino
Le grandi dorsali sottomarine sono le zone ove nuovo materiale roccioso sgorga dal sottostante manto fuso per entrare nella crosta terrestre.

L'ecologia marina
Per evitare mutamenti irreversibili, una saggia esplorazione del grande ecosistema oceanico deve affidarsi alle cognizioni e alla tecnica che ci derivano dalla scienza.

Le risorse fisiche del mare
All'attuale ritmo di consumo l'abbodanza dei metalli e delle sostanze minerali in soluzione nell'acqua marina e sul fondo dell'oceano non avrà limiti di sfruttamento per milioni di anni a venire.

Alimenti dal mare
Sotto la pressione della domanda alimentare esercitata sulla produzione della terraferma, l'industria della pesca oceanica deve passare dallo stadio della caccia e della raccolta di elementi nutritivi spontanei allo stadio dell'agricoltura.

La tecnologia e il mare
Le tecnologie oceaniche, interessate all'esplorazione, alla valorizzazione delle risorse e al controllo ambientale, devono essere necessariamente oggetto di un'impresa comune da parte dell'industria, dell'università e dei governi.

La sovranità sui mari
La nuova disponibilità di risorse sottomarine fa nascere difficili problemi di diritto internazionale, che richiedono una pronta soluzione diretta ad assicurare un'opera pacifica di esplorazione e sfruttamento degli oceani.

Informazione chimica e stereochimica di una molecola proteica

Il passaggio dalla struttura chimica a quella stereochimica di una catena polipeptidica è la traduzione di una frase scritta in un alfabeto di 20 lettere, in una frase scritta in un altro di 5 lettere

di Alfonso M. Liquori

Mentre la formula chimica di un composto rappresenta la sintesi logica di un complesso di osservazioni di tipo macroscopico, la struttura spaziale delle molecole che lo costituiscono corrisponde a una reale rappresentazione fisica. In altre parole, questa ci dice « come » gli atomi sono disposti, in che relazione spaziale reciproca essi si trovano.

I problemi relativi alla struttura spaziale, quasi mitizzati in passato (si pensi all'importanza addirittura mistica attribuita a certi tipi di simmetria), stanno oggi riacquistando grande importanza dacché sono stati messi in evidenza importanti legami tra strutture spaziali delle molecole e loro effetti.

Nel caso delle sostanze organiche, al fine di interpretarne completamente il comportamento chimico e fisico o le eventuali funzioni biologiche, devono adeguatamente venir delucidate sia la formula chimica sia la struttura spaziale. Studi in questo senso hanno portato a risultati estremamente significativi per grandi molecole di notevole complessità (si veda per esempio l'articolo *Polimerizzazione stereospecifica di idrocarburi diolefinici* di Giulio Natta in « Le Scienze », n. 3, novembre 1968). Anche per una fondamentale macromolecola biologica come il DNA, avente la ben nota struttura a « doppia elica », è stata raggiunta una soddisfacente comprensione delle correlazioni intercorrenti tra struttura chimica, struttura spaziale e funzione biologica. L'informazione chimica di questa macromolecola è infatti non soltanto codificata in modo lineare, ma anche la sua conformazione spaziale è rappresentabile sotto forma di cristallo unidimensionale tale che la sua struttura risulta praticamente invariante rispetto alla composizione.

ALA	ALANINA	GLY	GLICINA	PRO	PROLINA
ARG	ARGININA	HIS	ISTIDINA	SER	SERINA
ASN	ASPARAGINA	ILEU	ISOLEUCINA	THR	TREONINA
ASP	ACIDO ASPARTICO	LEU	LEUCINA	TRY	TRIPTOFANO
CYS	CISTEINA	LYS	LISINA	TYR	TIROSINA
GLU	ACIDO GLUTAMMICO	MET	METIONINA	VAL	VALINA
GLN	GLUTAMMINA	PHE	FENILALANINA		

Per una molecola proteica, il problema di chiarire le correlazioni tra struttura chimica e struttura spaziale si presenta invece molto piú complesso per la grande varietà di conformazioni accessibili e per la mancanza di un'apparente regolarità.

Struttura chimica di una molecola proteica

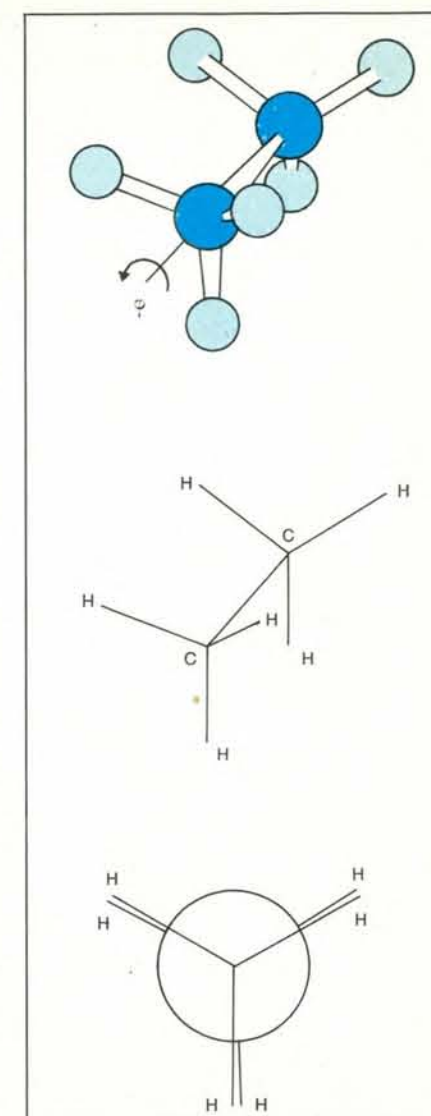
Come è noto, dal punto di vista chimico una proteina è costituita da una o piú catene formate da successioni lineari di unità piú semplici, gli amminoacidi, di 20 tipi diversi. Questi amminoacidi possono essere indicati con un codice a una lettera, e cioè con A, B, C, D, ..., oppure mediante i simboli — che sono quelli piú comunemente impiegati — raccolti nella tabella della pagina a fronte.

Ciascuna delle catene che formano una molecola proteica corrisponde quindi a una particolare sequenza di caratteri di un « alfabeto chimico » costituito da 20 lettere, cioè a una particolare « frase chimica ».

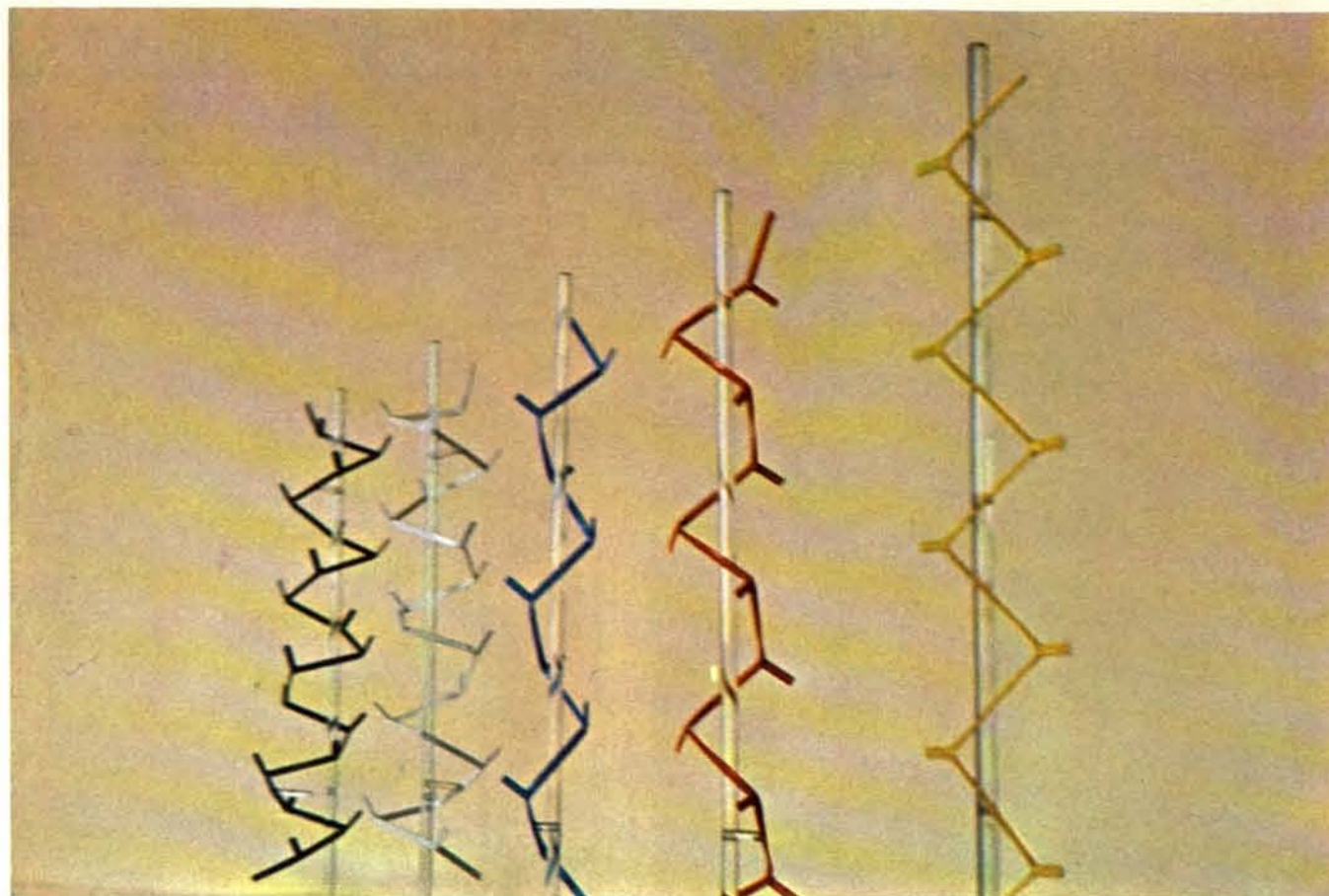
Le diverse sequenze sono codificate nel DNA secondo un meccanismo che costituisce ormai una delle piú solide conoscenze acquisite dalla moderna biologia molecolare. Senza scendere in particolari, basterà ricordare che esiste una correlazione tra le sequenze di caratteri dell'alfabeto chimico di 4 lettere corrispondenti alle quattro basi del DNA (adenina, citosina, guanina, timina) e le sequenze dell'alfabeto chimico di 20 lettere corrispondenti agli amminoacidi; in altri termini, si ha una corrispondenza tra le frasi scritte nel linguaggio delle 4 basi del DNA e le frasi scritte nel linguaggio chimico degli amminoacidi. Però, mentre per un grandissimo numero di proteine è stato stabilito il numero di catene che le costituiscono e è stata determinata la sequenza di amminoacidi in ciascuna catena (la cosiddetta « struttura primaria »), la struttura spaziale (o « struttura terziaria ») è stata invece definita con sufficiente precisione soltanto in un numero limitato di casi.

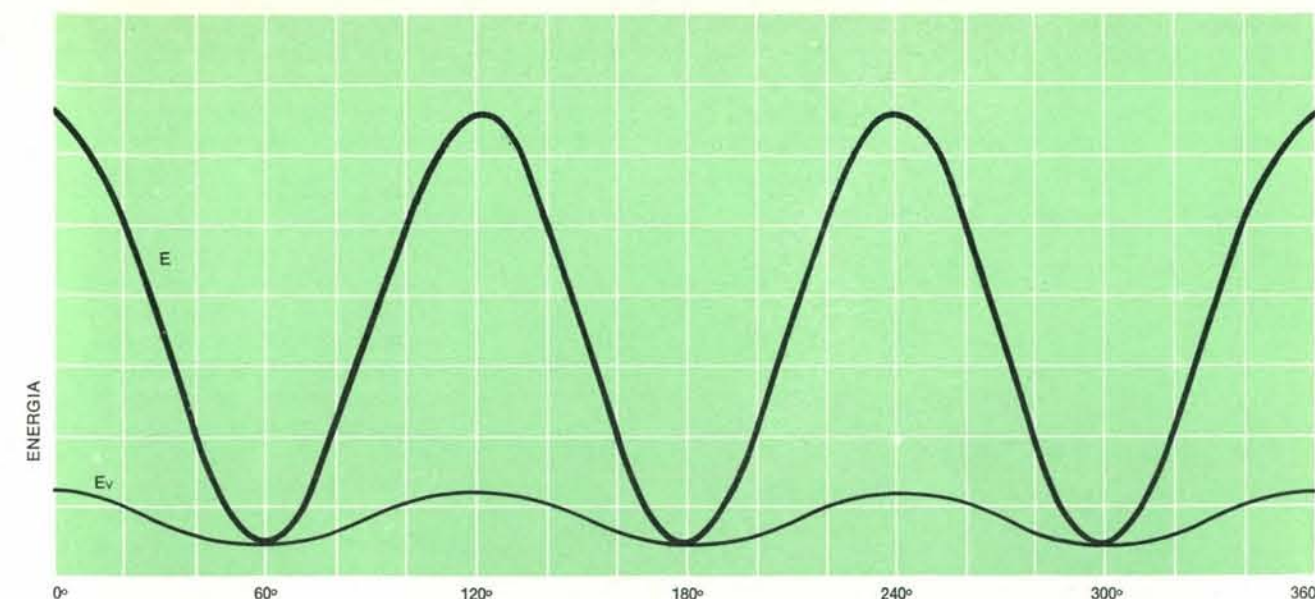
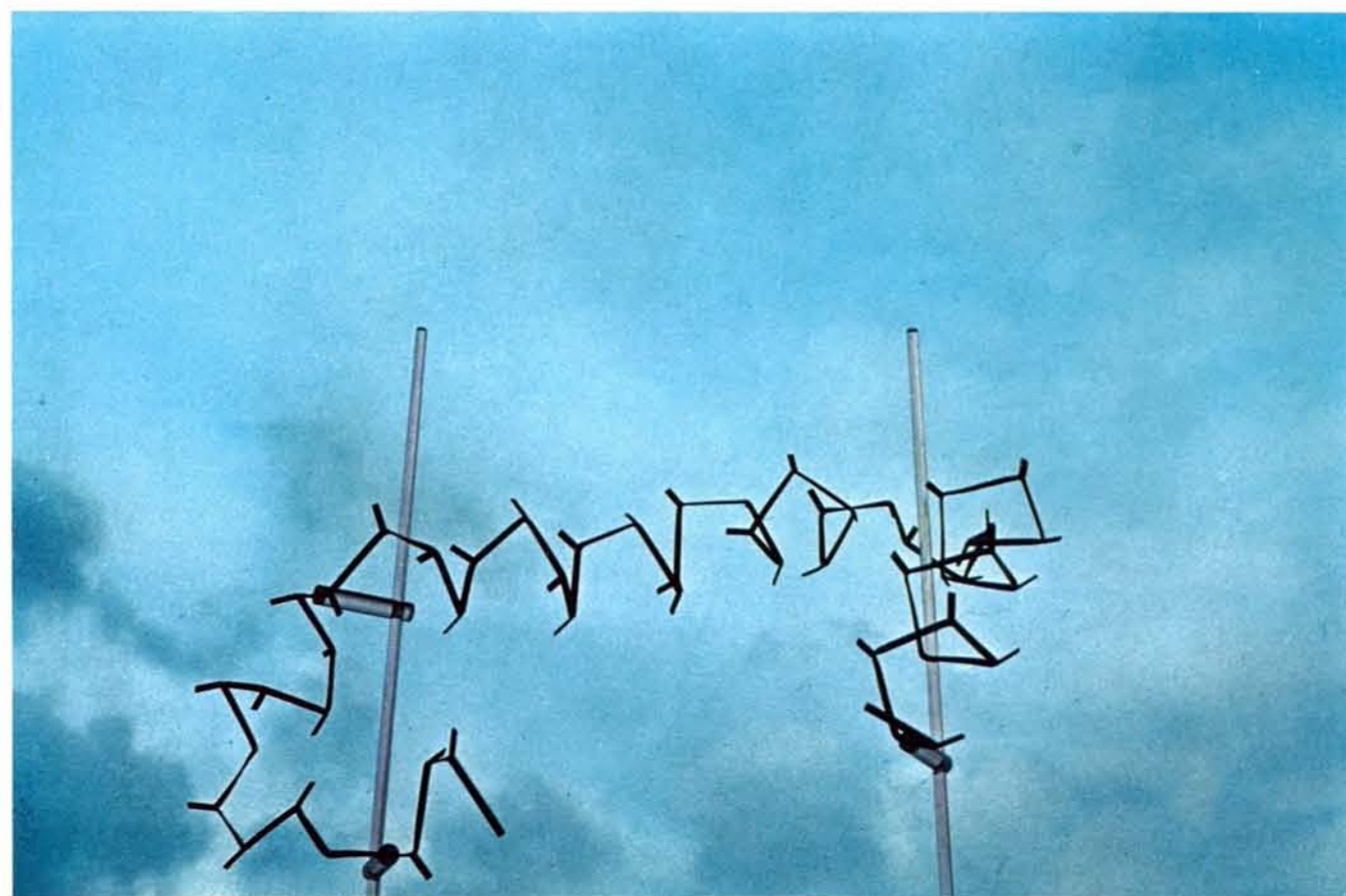
La presenza di segmenti della catena con conformazione regolare e quasi regolare (« struttura secondaria »), collegati da tratti irregolari, è subito emersa come l'aspetto piú caratteristico della struttura spaziale della prima proteina esaminata mediante la diffrazione dei raggi X (la mioglobina, a opera di J.C. Kendrew, e collaboratori, che ricevette assieme a M.F. Perutz il premio Nobel per la chimica nel 1962). Ciò aveva indotto a cercare di associare a particolari amminoacidi proprietà strutturali particolari. Questo approccio non ha però condotto a semplici regole in quanto veniva trascurato uno degli aspetti essenziali della struttura delle proteine, e cioè il suo carattere *cooperativo*.

Quando due amminoacidi si uniscono in seguito all'eliminazione di una molecola d'acqua si forma il cosiddetto legame peptidico. Quando piú amminoacidi si uniscono in questo modo, si forma una catena polipeptidica costituita dai « residui » degli amminoacidi in essa incorporati (ciascun residuo possiede una catena laterale caratteristica). La stabilità della struttura terziaria di una catena polipeptidica, avente una data sequenza di residui di amminoacidi, dipende infatti dalle forze che si esercitano nell'ambito dell'intera catena in presenza del solvente, e cioè dell'acqua. La situazione è infatti analoga, a parte la mancanza di una periodicità, a quella di un cristallo contenente molecole cosiddette « idrofobe », per esempio una paraffina in presenza di acqua. Le forze che determinano la stabilità di un sistema di questo tipo sono infatti sia vere e proprie forze attrattive fra le molecole di paraffina, sia « forze idrofobiche » corrispondenti alla tendenza da parte dell'acqua a escludere tali molecole in quanto un loro inserimento implicherebbe la riorganizzazione della sua struttura con conseguente diminuzione di entropia. Questo non è possibile giacché una diminuzione di entropia del sistema comporterebbe un aumento della sua energia libera, cioè un aumento della quantità di lavoro utile che il sistema può compiere, aumento che (senza energia fornita dall'esterno) sarebbe in contrasto con il secondo principio della termodinamica.

Si può però osservare che, una volta postulata la insolubilità di questo cristallo nell'acqua, è possibile prevederne correttamente la struttura in base alle forze che si esercitano fra le molecole che lo costituiscono, cercando quella disposizione che corrisponde a un minimo di energia interna. Questo significa trattare il cristallo sospeso nell'acqua come se si trovasse nel vuoto e allo zero assoluto, condizioni che corrispondono appunto al minimo di energia interna.

Tre diversi modi di rappresentare la conformazione eclissata dell'etano (H_3C—CH_3). Dall'alto in basso, il modello molecolare, la formula prospettica e la proiezione di Newmann. Quest'ultima si ottiene guardando la molecola lungo il legame attorno a cui avviene la rotazione.

Calcoli di questo tipo, eseguiti per parecchi cristalli molecolari, hanno in effetti portato a risultati estremamente soddisfacenti. Le ricerche in questo campo hanno infatti permesso di definire con sufficiente precisione le funzioni matematiche che rappresentano la variazione dell'energia potenziale al variare della distanza fra atomi non chimicamente legati tra loro. È stato inoltre possibile dimostrare come, in casi favorevoli, sia possibile stabilire completamente a priori la struttura di un cristallo molecolare e risolvere il cosiddetto « problema delle fasi » che si presenta nel primo stadio della determinazione di una struttura molecolare mediante la diffrazione dei raggi X (si veda l'articolo *Cristallografia a raggi X* di Sir Lawrence Bragg in « Le Scien-

Formula di struttura di un frammento di catena polipeptidica. Ogni catena ha uno scheletro costituito da una serie di ripetizioni di identiche triplette di legami C_α—C, N—C_α e C—N; a tale scheletro sono legate venti catene laterali diverse, qui rappresentate dai diversi residui amminoacidi R_n. La parte di questa formula che è disegnata in colore corrisponde alla unità che nell'articolo viene considerata come indipendente dal resto della catena durante lo studio conformazionale delle catene.

Tra le successioni di lettere dell'alfabeto stereochimico sono comprese cinque successioni «infinite» che corrispondono a conformazioni regolari di uno scheletro di tipo a elica (*in alto*).

Un tratto della catena polipeptidica della mioglobina (*in basso*), la prima proteina studiata con i raggi X, che corrisponde a una ben determinata sequenza di lettere dell'alfabeto stereochimico.

Profilo dell'energia potenziale di una molecola di etano durante le variazioni dell'angolo azimutale φ. Si hanno minimi di energia (buche) alternati a massimi (barriere), ma le barriere sono inferiori a quelle osservate sperimentalmente. Sviluppando questa differenza in serie di Fourier si ha un andamento più simile a quello osservato sperimentalmente (*curva piú marcata*).

ze », n. 3, novembre 1968). La tecnica adatta, scoperta appunto da Kendrew e Perutz, consente di ottenere (sempre con l'ausilio di un calcolatore) l'immagine tridimensionale della molecola in esame.

Il contributo delle forze intramolecolari alla stabilità di una proteina può in prima approssimazione essere trattato separatamente da quello delle forze idrofobiche supponendo che la struttura terziaria non corrisponda soltanto a un minimo di energia potenziale ma anche a un minimo di energia libera, nel senso che le molecole si possono considerare come « cristalli aperiodici », sospesi anziché disciolti nell'acqua. Questa ipotesi implica che la sequenza degli amminoacidi (selezionata per effetto di successive mutazioni) sia tale da soddisfare entrambe le suddette condizioni.

Adottata questa ipotesi, il problema delle forze intramolecolari può venir affrontato cercando di individuare, tra i molteplici contributi, quelli che si possono considerare piú importanti ai fini di identificare le strutture di minima energia potenziale. È superfluo aggiungere che un'analisi di questo tipo sarebbe impossibile se non si adottassero metodi di approssimazione e affinamenti successivi, e se non si introducessero efficaci criteri esemplificativi.

Geometria e stereochimica di una molecola proteica

Il primo stadio di un'analisi conformazionale consiste nella scelta opportuna dei parametri che definiscono la struttura spaziale di una molecola e nella separazione fra le variabili che si possono considerare costanti nel problema e le variabili che condizionano la funzione che si cerca di minimizzare, e cioè l'energia potenziale del sistema.

Ogni catena polipeptidica caratterizzata da una particolare sequenza di amminoacidi può venir rappresentata mediante uno scheletro che può essere a sua volta generato per mezzo della ripetizione di tre legami chimici di lunghezza differente e formanti tra loro angoli diversi. Questi tre legami sono rispettivamente quello tra il carbonio α (C_α, l'atomo di carbonio al quale sono legate le « catene laterali » caratteristiche di ciascun amminoacido) e l'altro atomo di carbonio, quello tra il carbonio α e l'atomo di azoto e quello tra l'atomo di carbonio e quello di azoto (*si veda la figura a pag. 62*). L'unica eccezione a questo schema è rappresentata dalla prolina che contiene un ciclo comprendente un gruppo immidico e che pertanto va considerata a parte.

Attribuendo valori standard per tutti gli amminoacidi alle lunghezze dei legami e ai loro angoli è possibile variare la conformazione spaziale dello scheletro di una catena polipeptidica effettuando delle rotazioni attorno ai tre legami N–C_α, C_α–C e C–N. Per ciascuna delle conformazioni dello scheletro ottenute in questo modo è inoltre possibile variare la conformazione delle catene laterali effettuando delle rotazioni attorno ai legami non rigidi in esse contenuti. Queste rotazioni provocano delle variazioni di energia che possono essere analizzate convenientemente secondo un metodo che illustreremo nel caso di una molecola estremamente semplice quale l'etano (H_3 C–CH_3).

L'applicazione piú immediata dei metodi della chimica quantistica indicherebbe che l'energia di una molecola di etano con lunghezze e angoli di legame rigidi è invariante rispetto a rotazioni attorno al legame C–C; in altri termini, la molecola di etano presenta simmetria assiale. Però, numerose osservazioni sperimentali e calcoli teorici indicano l'esistenza di buche e di barriere periodiche di energia potenziale sfasate di 120°. Si hanno cioè dei massimi e dei minimi di energia potenziale che dipendono dalla posizione relativa dei due gruppi metilici (CH_3) durante la loro rotazione attorno all'asse passante per il legame C–C. Nel caso di una molecola abbastanza semplice come l'etano è possibile calcolare questo effetto mediante metodi piú raffinati della meccanica quantistica. I risultati di una analisi di questo tipo non sono però direttamente estensibili a una macromolecola e è per questo motivo che conviene adottare un approccio piú semplice del tipo seguente.

Consideriamo come conformazione di riferimento di una molecola di etano la cosiddetta conformazione eclissata (*eclipsed*), cioè quella in cui gli atomi di idrogeno dei due gruppi metilici hanno la stessa coordinata angolare φ rispetto a un asse passante per il legame C–C (*si veda la figura a pagina 63*). Questa conformazione sarà caratterizzata da un insieme di valori delle distanze fra gli atomi di idrogeno non legati allo stesso atomo di carbo-

nio. Se variamo l'angolo azimutale φ, queste distanze varieranno e sarà quindi possibile calcolare l'energia della molecola per variazioni di φ da 0° a 360° L'andamento dell'energia durante queste variazioni (E_V) si ha sommando i contributi di energia potenziale corrispondenti a tutte le interazioni fra le coppie di atomi di idrogeno. Si ottiene così una funzione, come quella mostrata nella figura a pagina 65, che presenta l'andamento corretto ma in cui le barriere di potenziale sono inferiori a quelle determinate sperimentalmente. Sviluppando questa differenza in serie di Fourier, si può scrivere la variazione totale di energia potenziale (*E*) come somma di due termini: il termine E_V già definito, e un termine E_T. Quest'ultimo viene detto « potenziale torsionale » in quanto rappresenta la variazione di energia dovuta alle torsioni attorno al legame C–C, variazione che non è semplicemente attribuibile a interazioni tra atomi non legati chimicamente.

Passando ora a esaminare da un punto di vista analogo una catena polipeptidica, si dovranno considerare le rotazioni attorno ai legami N–C_α, C_α–C e C–N di tutti i residui di amminoacidi – tranne i due legami terminali – e le rotazioni attorno a tutti i legami non rigidi e non terminali delle catene laterali. Il problema è complesso, ma è possibile affrontarlo gradualmente prendendo in considerazione l'unità mostrata in colore nella formula a pagina 62. Tale unità può infatti essere considerata indipendente in quanto si può mostrare che la sua conformazione non è influenzata dalla conformazione del residuo di amminoacido precedente e successivo. Inoltre, le conformazioni di energia minima dello scheletro di una unità « indipendente » sono con buona approssimazione invarianti qualunque sia la natura chimica della catena laterale, naturalmente purché anche questa adotti conformazioni energeticamente permesse.

Per selezionare le conformazioni più stabili di un'unità indipendente converrà considerare il caso della L-alanina (nella quale il radicale R è un gruppo metilico CH_3) e proiettare tale unità sui tre piani perpendicolari ai legami N–C_α, C_α–C e C–N (*si vedano le figure in queste due pagine e alla pagina seguente*). Come origine per la misura degli angoli di rotazione φ, ψ, ω attorno a questi legami si assume la posizione in cui tutti gli atomi dello scheletro giacciono sullo stesso piano; in altri termini, quando l'unità ha una conformazione transplanare i tre angoli sono considerati nulli.

Poiché nel caso di una catena polipeptidica aperta il legame peptidico C–N può essere considerato, in prima approssimazione, rigido e in conformazione transplanare, generalizzando quanto abbiamo visto per una molecola di etano, anche l'energia di un'unità indipendente può essere considerata come somma di due termini: 1) E_V, che rappresenta la variazione di energia potenziale corrispondente alle interazioni tra tutti gli atomi non direttamente legati contenuti in una unità indipendente; 2) E_T, il potenziale torsionale. Poiché l'energia dipende dagli angoli ψ e φ di rotazione attorno ai legami C–C_α e N–C_α, la stessa può essere rappresentata – in funzione di tali angoli – su un grafico bidimensionale mediante linee isoenergetiche di livello, come è mostrato nella figura in alto a pagina 69. Come si può osservare, sono presenti cinque minimi distinti che diventano ancor più profondi se si considerano successioni infinite di unità indipendenti aventi la stessa conformazione, cioè delle eliche, come è mostrato nella figura in basso a pagina 69. Questa stabilizzazione (ricordiamo che tanto è minore l'energia tanto più stabile è la conformazione) è il risultato degli effetti di cooperazione che risultano particolarmente evidenti in alcuni casi e che giustificano il perché un'elica venga descritta come un cristallo unidimensionale.

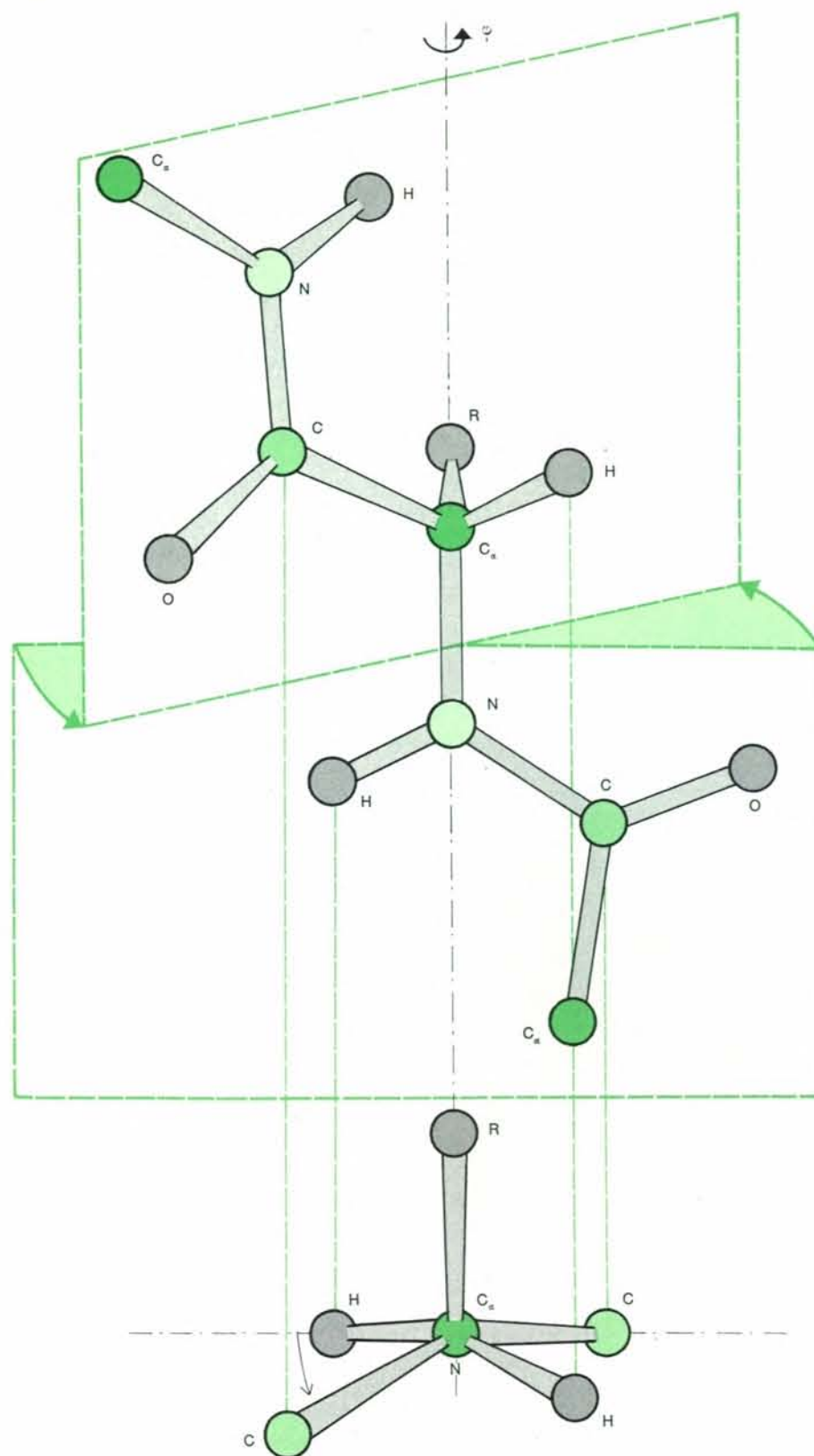
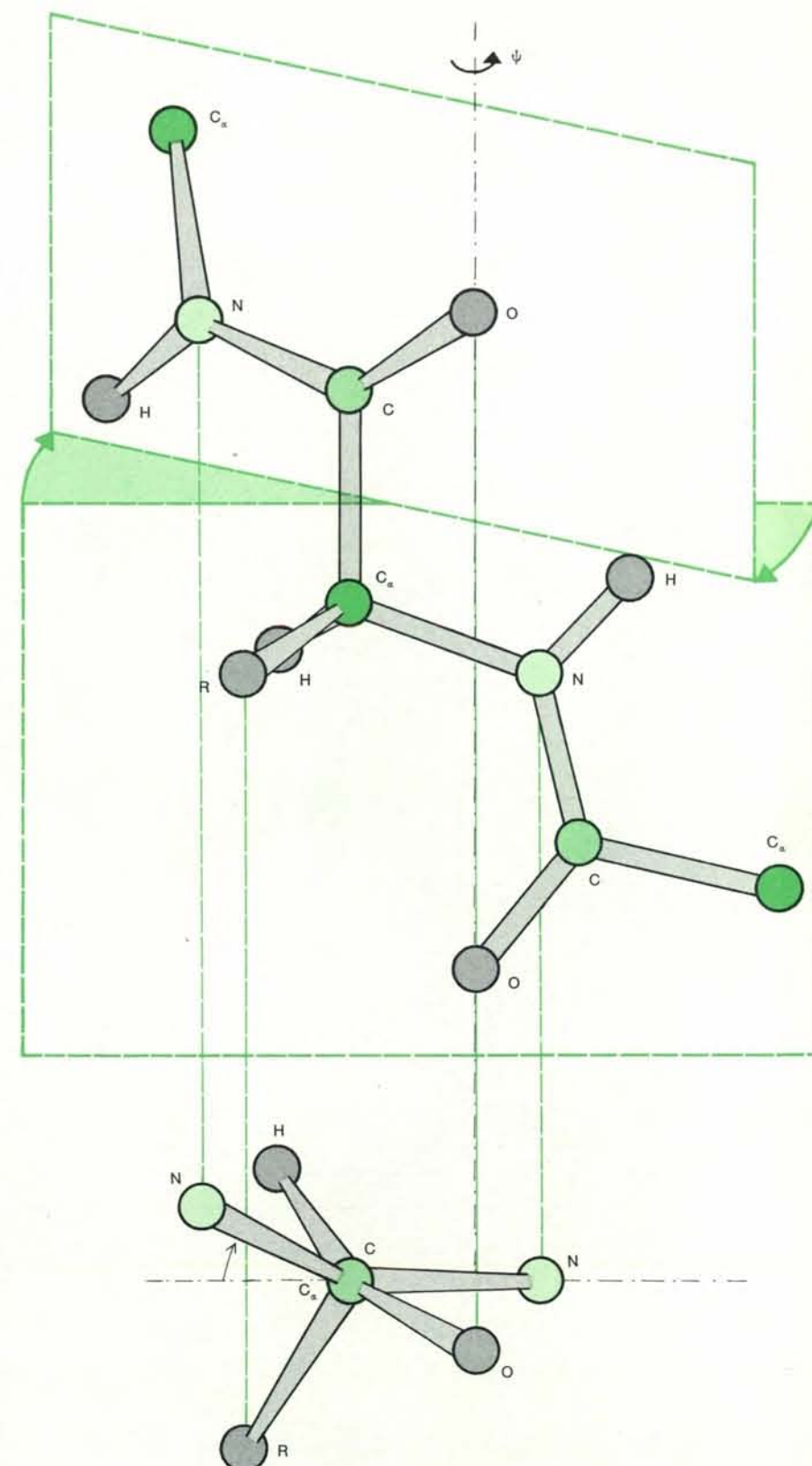
La conclusione più interessante a cui si giunge da questo risultato è il fatto che per una unità indipendente, e quindi per un residuo di amminoacido in una catena polipeptidica, risultano favorite dal punto di vista energetico le cinque conformazioni mostrate nella figura a pagina 70.

Benché le mappe riportate nelle figure a pagina 69 si riferiscano alla L-alanina, anche le catene laterali possono assumere, come si è già detto, un numero discreto di conformazioni stabili che può raggiungere il valore massimo di 3^n, dove *n* è il numero di legami non terminali della catena laterale che non si debbano considerare rigidi come nel caso in cui facciano parte di cicli.

Per esempio, nel caso della prolina sono permesse solo due delle cinque conformazioni, mentre nel caso della glicina le conformazioni permesse sono molto meno ristrette che per gli altri amminoacidi e sono in numero maggiore a causa della mancanza di sostituenti legati all'atomo di carbonio α.

Le cinque conformazioni permesse

Se per semplicità indichiamo le cinque conformazioni permesse con *a, b, c, d, e* (di solito vengono indicate nell'ordine con Ra, b, c, d, La), potremo descrivere qualsiasi conformazione energeticamente stabile dello scheletro con una particolare successione di tali lettere. Fra queste sono comprese le cinque successioni « infinite », e precisamente *aaa..., bbb..., ccc..., ddd..., eee...*

Come si è già detto, queste successioni corrispondono a conformazioni « regolari » dello scheletro che possono essere descritte come spirali o, più correttamente, come eliche. Queste eliche sono mostrate nella figura in alto a pagina 64 dove sono rappresentate come una successione di « legami virtuali » che collegano gli atomi di carbonio α, in modo da mettere in evidenza l'equivalenza conformazionale tra unità indi-

Proiezione spaziale di una parte della catena di L-alanina. In questo caso la proiezione è eseguita prendendo come base l'asse costituito dal legame azoto-carbonio alfa.

Altra proiezione spaziale di una parte della catena di L-alanina. In questo caso la proiezione è eseguita usando come base l'asse costituito dal legame carbonio-carbonio α.

pendenti consecutive.

La prima e l'ultima di tali eliche possono essere identificate con la ben nota elica alfa, o α-elica, e sono rispettivamente destrorsa e sinistrorsa. (Le catene polipeptidiche si avvolgono a vite, con un numero infinito di spire di cui ciascuna contiene 3,6 residui di amminoacidi per spira; dall'elica escono radialmente le catene laterali dei residui.)

È interessante domandarsi in che misura le cinque conformazioni locali preferite da un residuo di amminoacido in una catena polipeptidica possano venir perturbate per effetto di interazioni con altri residui di amminoacidi. Come è già stato detto, le perturbazioni dovute a interazioni fra amminoacidi direttamente adiacenti sono praticamente assenti, mentre sono possibili perturbazioni fra amminoacidi distanti nella struttura primaria. Cosí, per esempio, in una sequenza del tipo *...aaax...* o *...xaaa...* si possono verificare interazioni fra l'amminoacido con conformazione *x* e quelli non immediatamente adiacenti con conformazione *a*, interazioni tali da produrre sensibili deviazioni dai valori standard degli angoli di rotazione che caratterizzano le conformazioni preferite delle unità indipendenti. Queste sequenze si incontrano all'inizio e alla fine di un segmento α-elicoidale che ne risulta quindi distorto. Se tale segmento è particolarmente corto, come per esempio in certe sequenze del tipo *...xaaax...*, esso può assumere una conformazione sensibilmente differente da quella di una elica alfa.

Terza proiezione spaziale di una parte della catena di L-alanina. In quest'ultimo caso la proiezione è eseguita prendendo come base l'asse costituito dal legame azoto-carbonio.

Linguaggio « chimico » e « stereochimico »

Le precedenti considerazioni implicano chiaramente che alla frase chimica che descrive la sequenza degli amminoacidi, o struttura primaria della catena polipeptidica, si può far corrispondere una successione singolare di elementi *a, b, c, d, e,* è cioè una frase stereochimica scritta in un alfabeto di cinque lettere.

Supponiamo che la frase chimica sia

ABCDFONPQRMBAACDEFNCBD

e che quella stereochimica sia

abcddaaaaaacdbbbbcadaa.

Possiamo osservare che le ripetizioni finite di lettere dell'alfabeto stereochimico corrispondono a tratti di catene con struttura secondaria. Quelle sinora trovate sono ripetizioni di *a,* cioè sono tratti α-elicoidali destrorsi piú o meno distorti, o ripetizioni di *b,* cioè tratti con conformazione β (che sono tratti quasi planari).

La validità di questa rappresentazione di struttura terziaria di una proteina formata da una singola catena polipeptidica è stata verificata nel nostro laboratorio nel caso della mioglobina. Per questa proteina è stato infatti possibile trovare una successione di lettere dell'alfabeto stereochimico che riproduce, quasi entro l'errore sperimentale, la struttura terziaria. Deviazioni marcate si hanno nelle regioni terminali di successione regolari e sono in larga misura da attribuirsi, come si è detto, alla loro lunghezza finita. Nella figura in basso a pagina 64 è mostrato un tratto di catena della mioglobina corrispondente a una sequenza di lettere dell'alfabeto stereochimico, e cioè alla « parola stereochimica »

aaaadabaaaaaadaaaaaaaaaaa

aaaaaaaaeecaaaaaaaaaaaaaa

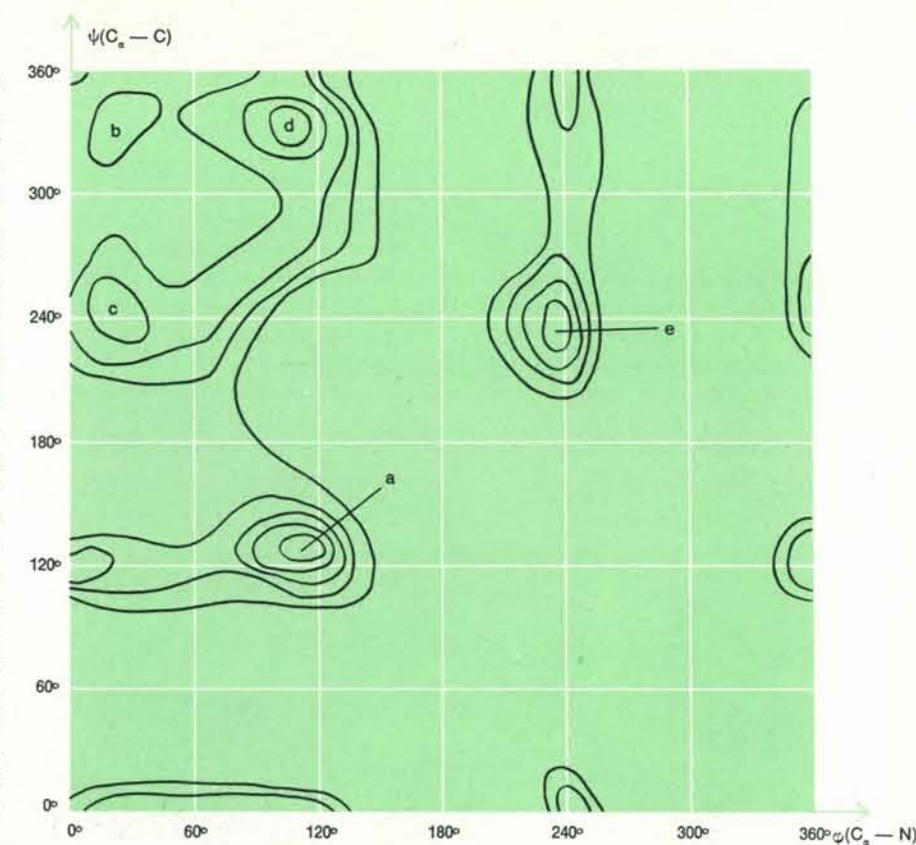
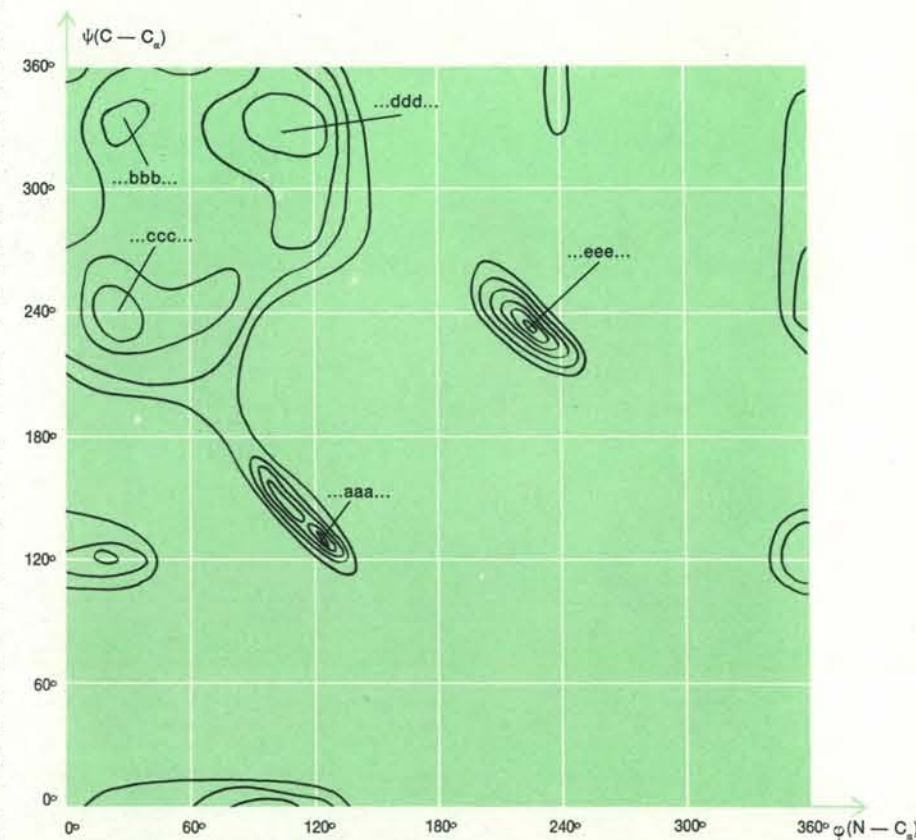
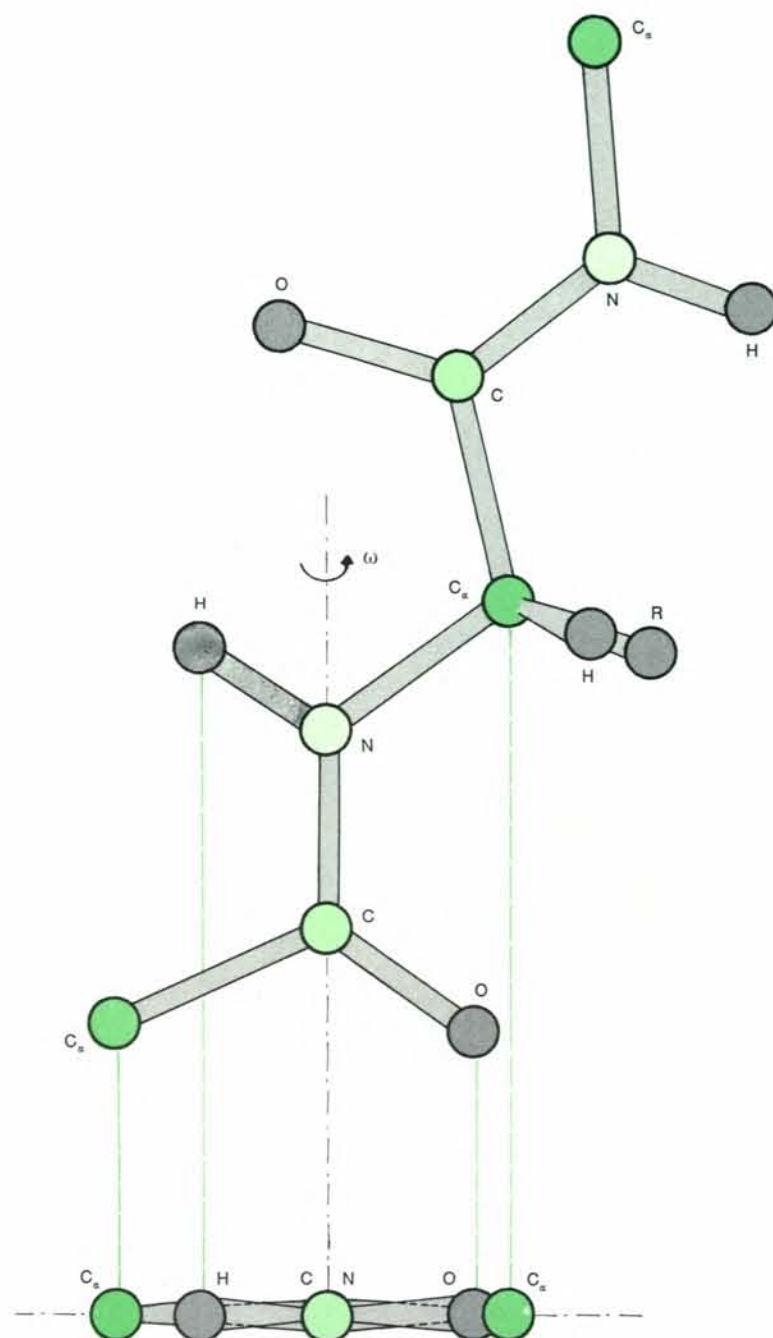
Anche in questo caso sono stati rappresentati i legami virtuali che collegano gli atomi di carbonio in modo da mettere in evidenza il « cammino conformazionale » percorso dalla catena principale.

Traduzione stereochimica

Va ulteriormente sottolineato che la frase chimica e la frase stereochimica, corrispondenti rispettivamente alla struttura primaria e alla struttura terziaria della catena polipeptidica, sono scritte in due linguaggi diversi. Ciò perché, mentre a ogni lettera dell'alfabeto chimico corrisponde un dato amminoacido, a ogni lettera dell'alfabeto stereochimico corrisponde una particolare conformazione permessa per qualsiasi amminoacido (a parte le eccezioni già viste per la prolina e la glicina). L'identità del numero di caratteri non deve perciò far ritenere possibile un passaggio dalla prima alla seconda mediante semplice sostituzione di singole lettere dell'alfabeto chimico con singole lettere dell'alfabeto stereochimico, cioè per diretta « translitterazione ». Tale trasformazione corrisponde invece a una vera e propria « traduzione stereochimica » che implica la conversione nel linguaggio stereochimico di lunghi blocchi di caratteri chimici o addirittura dell'intera frase chimica corrispondente all'intera catena polipeptidica.

Una delle proprietà su cui si basa un metodo di traduzione di una frase da una lingua all'altra risiede, come è noto, nel carattere sequenziale di tali frasi. Data perciò la prima, si può generare sequenzialmente la seconda in un processo a stadi tale che ogni stadio successivo è condizionato da quelli precedenti; questi stadi corrispondono alla traduzione di parole o di gruppi di parole.

Allo stesso modo, si può postulare che durante la sintesi biologica di una catena polipeptidica che cresce nel senso indicato dalla freccia nella figura a pagina 62, blocchi successivi di amminoacidi vengano « congelati » nella struttura spaziale che poi conserveranno nella proteina finita (che si suppone formata da una singola catena). Durante tale processo si può ammettere che la struttura di ciascun blocco sia condizionata dalle strutture assunte dai blocchi precedenti.

Da un punto di vista fisico, una tale formazione sequenziale della struttura terziaria può venir giustificata assumendo che la catena percorra, durante la sua crescita, un cammino di massima stabilità relativa, cioè di minima energia libera relativa. La completa stabilità termodinamica, analoga a quella di un cristallo, si raggiunge probabilmente soltanto quando la catena è praticamente completa. Tratti isolati di catene, contenenti anche un numero elevato di amminoacidi, non possono perciò assumere in soluzione la stessa

Andamento dell'energia potenziale conformazionale della L-alanina. Le curve di livello riportate in questa mappa segnalano la presenza di cinque minimi distinti.

Quando si considerano successioni infinite di unità indipendenti aventi la stessa conformazione, i minimi individuati dalla figura precedente risultano piú profondi e si ha quindi una maggiore stabilizzazione. I cinque minimi di questa mappa e della mappa in alto corrispondono alle conformazioni illustrate nella pagina seguente.

struttura che hanno nella catena completa, ma adottano in media nel tempo un gran numero di conformazioni corrispondenti a diversi minimi di energia libera.

Gene, struttura primaria e struttura terziaria

Sulla base delle precedenti argomentazioni, si può concludere che la struttura chimica di un segmento di DNA, cioè di un gene, codifica la struttura primaria di una catena polipeptidica di una proteina che si traduce a sua volta spontaneamente in una struttura terziaria che può essere descritta in base a un alfabeto, o codice stereochimico, relativamente semplice.

Ovviamente, un alfabeto chimico è costituito da elementi corrispondenti a unità chimiche ben definite, mentre gli elementi di un codice stereochimico sono meno rigidamente definiti in quanto corrispondono a conformazioni spaziali di unità chimiche. L'utilità di tale codice risiede perciò non tanto nella precisione che esso consente nella descrizione di una struttura terziaria, quanto nella possibilità che esso offre di razionalizzare le correlazioni fra struttura chimica e struttura stereochimica.

Il codice stereochimico consente tra l'altro di spiegare come la struttura terziaria di una proteina possa rimanere praticamente inalterata per effetto di una mutazione corrispondente alla sostituzione di un amminoacido: basta ammettere infatti che lo scheletro del nuovo amminoacido conservi la stessa conformazione di quello dell'amminoacido sostituito. Mutazioni di questo tipo possono cioè essere considerate come sostituzioni di caratteri della frase chimica che non modificano la frase stereochimica. Queste sostituzioni sono possibili soltanto se la catena laterale del nuovo amminoacido non altera sensibilmente le forze idrofobiche e se non provoca conflitti sterici, cioè se l'ingombro dei vari atomi e gruppi non altera la stabilità del cristallo aperiodico. L'eventuale modifica nella funzione biologica sarebbe quindi dovuta non a una variazione vera e propria di struttura terziaria bensí a una variazione topochimica. Al contrario, mutazioni che alterano profondamente la struttura terziaria si possono considerare come casi in cui la sostituzione di alcuni caratteri della frase chimica modifica radicalmente la traduzione stereochimica o ne abolisce addirittura il « significato stereochimico ».

Per esempio, dal confronto fra le sequenze di emoglobina di specie differenti si può dedurre che mutazioni « catastrofiche » per la struttura terziaria si verificano presumibilmente quando vengono sostituiti i cosiddetti amminoacidi invarianti, cioè quegli amminoacidi che non risultano cambiati in nessuna emoglobina. È interessante notare che, per esempio, uno di questi amminoacidi è una glicina (che non ha catena laterale). Da un esame della struttura è anche possibile osservare che la sostituzione con qualsiasi altro amminoacido provocherebbe conflitti sterici e probabilmente richiederebbe modificazioni della frase stereochimica tale da non corrispondere piú a una struttura terziaria stabile nel senso illustrato prima.

In conclusione, nonostante la struttura di una proteina globulare presenti aspetti di notevole complessità, appare possibile introdurre dei criteri relativamente semplici per spiegare la sua stabilità e alcune delle sue proprietà.

Sembra infatti che i residui di amminoacidi possano assumere stati conformazionali quasi discreti e che la scelta di uno di questi stati da parte di un dato amminoacido sia influenzata in generale dalla scelta di tutti gli altri amminoacidi. Questa condizione implica un elevato grado di cooperatività nella struttura della macromolecola che può perciò venir considerata come una « molecola cristallina » nonostante la mancanza di periodicità. Questa singolare proprietà appare d'altra parte strettamente legata a particolari sequenze chimiche dei residui di amminoacidi formanti la catena polipeptidica. Tali sequenze devono infatti soddisfare sia la condizione di minima energia interna (come risultato di efficienti interazioni intramolecolari) sia la condizione di massima stabilità nei confronti dell'acqua (forze idrofobiche) nelle condizioni chimico-fisiche in cui la struttura terziaria è presente.

Le cinque conformazioni dei residui di amminoacido in una catena polipeptidica che risultano favorite dal punto di vista energetico, anche in base alle mappe della pagina precedente. Queste conformazioni, che vengono normalmente indicate con le sigle Ra (*a*), b (*b*), c (*c*), d (*d*) e La (*e*) corrispondono alla cinque lettere del codice stereochimico. La ripetizione di queste conformazioni di un residuo di amminoacido genera i cinque tipi di eliche mostrate nella figura in alto a pagina 64. La prima di esse è la ben nota elica alfa illustrata nella pagina a fronte.

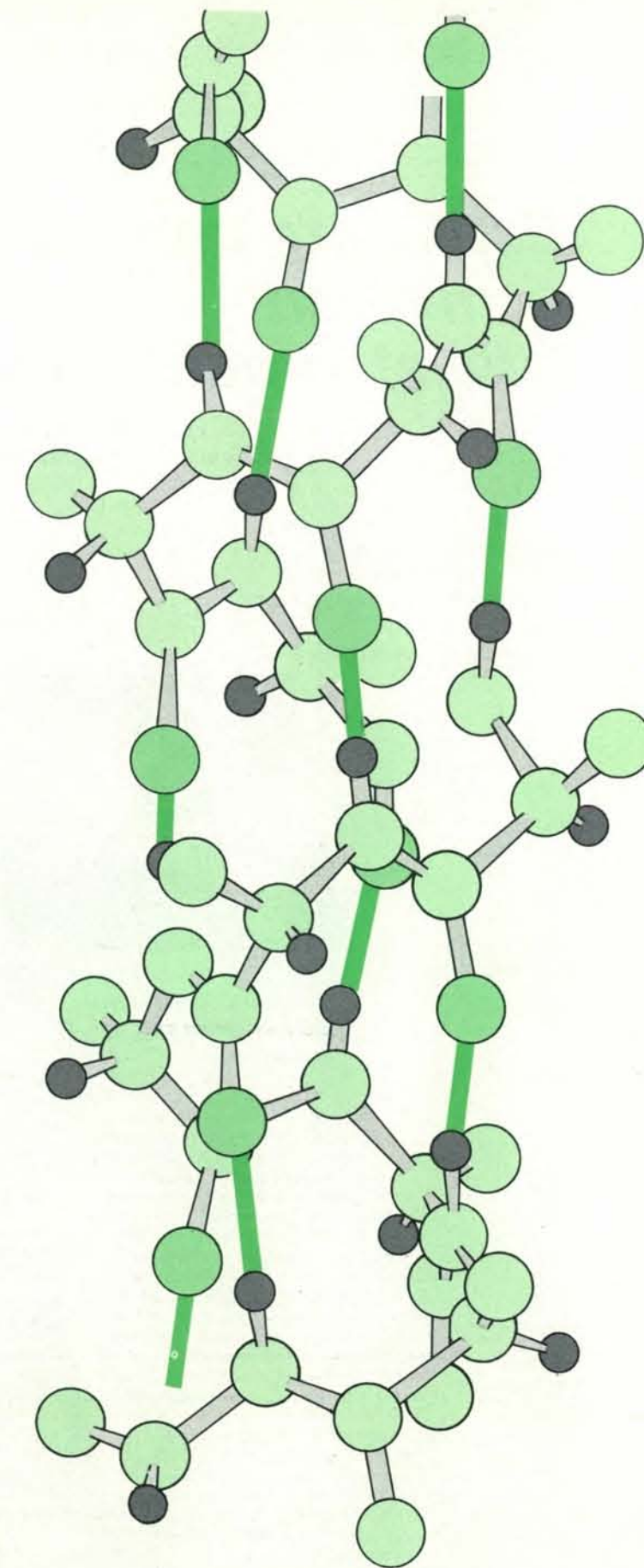
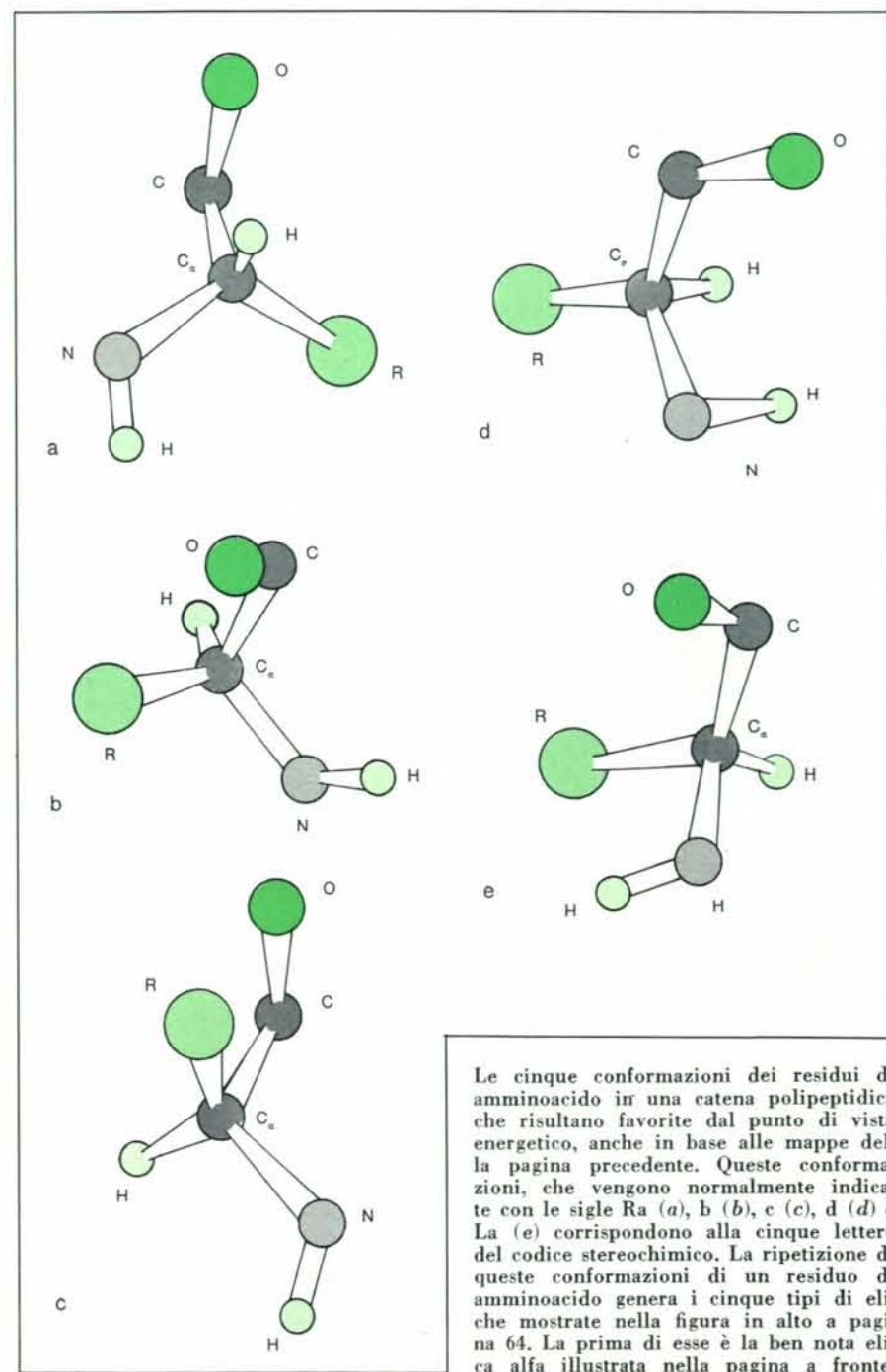
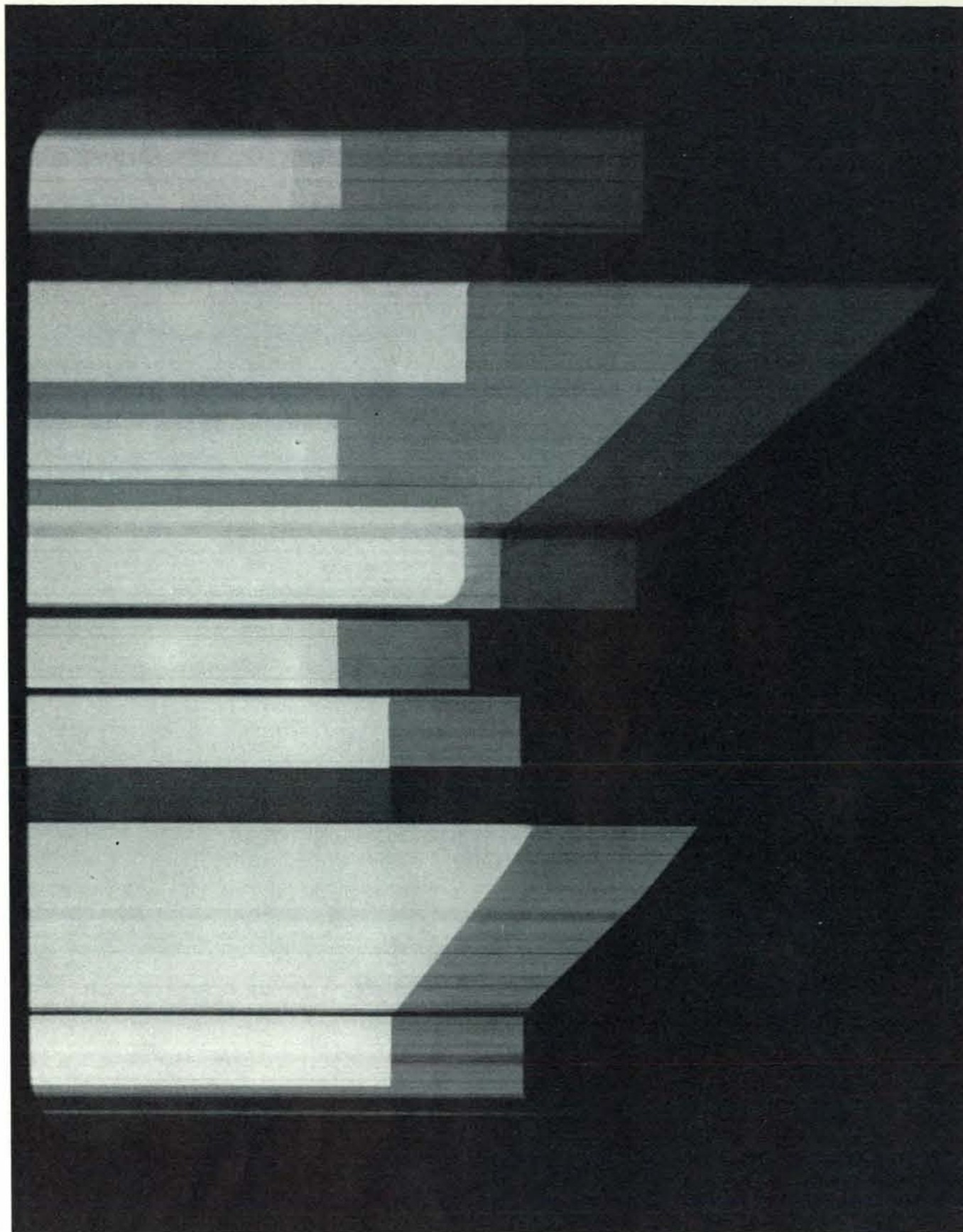
Benché tutte queste considerazioni siano state sviluppate nell'ipotesi che la proteina consista di una singola catena polipeptidica, è probabile che esse siano estensibili al caso di proteine costituite da piú di una catena (proteine oligomeriche). In questo caso il concetto di cooperatività sembrerebbe valido anche per residui di amminoacidi appartenenti a catene polipeptidiche (o subunità) distinte e quindi eventuali perturbazioni in una particolare regione di una data subunità potrebbero facilmente propagarsi in altre subunità provocando quei cosidetti effetti di « interazione fra siti » che si osservano in molte proteine oligomeriche di cui l'esempio piú noto è rappresentato dalla emoglobina.

Questa proteina è infatti costituita da quattro catene polipeptidiche eguali a due a due e disposte approssimativamente ai vertici di un tetraedro irregolare. A ciascuna di queste catene è fissato un gruppo (eme) capace di legare una molecola di ossigeno.

Dall'andamento della curva di ossigenazione appare evidente che l'assorbimento di ossigeno da parte di un gruppo è facilitato dalla fissazione di ossigeno da altri gruppi eme.

Poiché questi gruppi (o siti) sono molto distanti fra loro è probabile che la reazione dell'ossigeno con un sito provochi una perturbazione nell'intorno del sito che si propaga all'interno della molecola fino a raggiungere altri siti.

È difficile precisare allo stato attuale l'esatta natura di tale perturbazione ma appare probabile che si tratti di effetti molto piccoli.

È stato comunque dimostrato che quando i quattro siti hanno fissato altrettante molecole di ossigeno le disposizioni relative delle quattro catene risultano leggermente alterate. Poiché, come si è detto, le conformazioni locali dello scheletro dei residui di amminoacidi nella catene polipeptidiche dovrebbero conservare una certa rigidità, è molto probabile che le modeste variazioni conformazionali in gioco siano essenzialmente da attribuirsi a movimento delle catene laterali di alcuni amminoacidi.

La piú comune conformazione delle catene polipeptidiche è l'elica alfa che fu ipotizzata per la prima volta da Pauling. La stabilità di questa struttura è dovuta all'interazione fra atomi non legati, alla formazione di numerosi legami a idrogeno intermolecolari (*in colore pieno*) e alla disposizione favorevole delle varie catene laterali.

Questa registrazione ottica di un'onda d'urto in un solido è stata ottenuta fotografando la luce riflessa dagli specchi montati sul campione e sul piatto che lo sostiene. Un intenso fascio luminoso viene inviato sugli specchi e da questo riflesso attraverso una o piú fenditure, come mostra schematicamente la figura nella pagina a fronte; le immagini delle fenditure sono fatte scorrere velocemente su una pellicola fotografica mediante uno specchio rotante. In questo caso c'erano tre fenditure dotate di filtri diversi; ai filtri è dovuto il diverso grado di luminosità delle strisce. Quando un'onda d'urto, in questo caso causata da un'esplosione, raggiunge uno specchio, esso non riflette piú e l'immagine fotografica termina, verticalmente nel caso di specchi montati parallelamente rispetto al campione e obliquamente nel caso di specchi montati obliquamente. Interpretando e studiando opportunamente la fotografia è possibile determinare la velocità dell'urto e del moto alla superficie del campione.

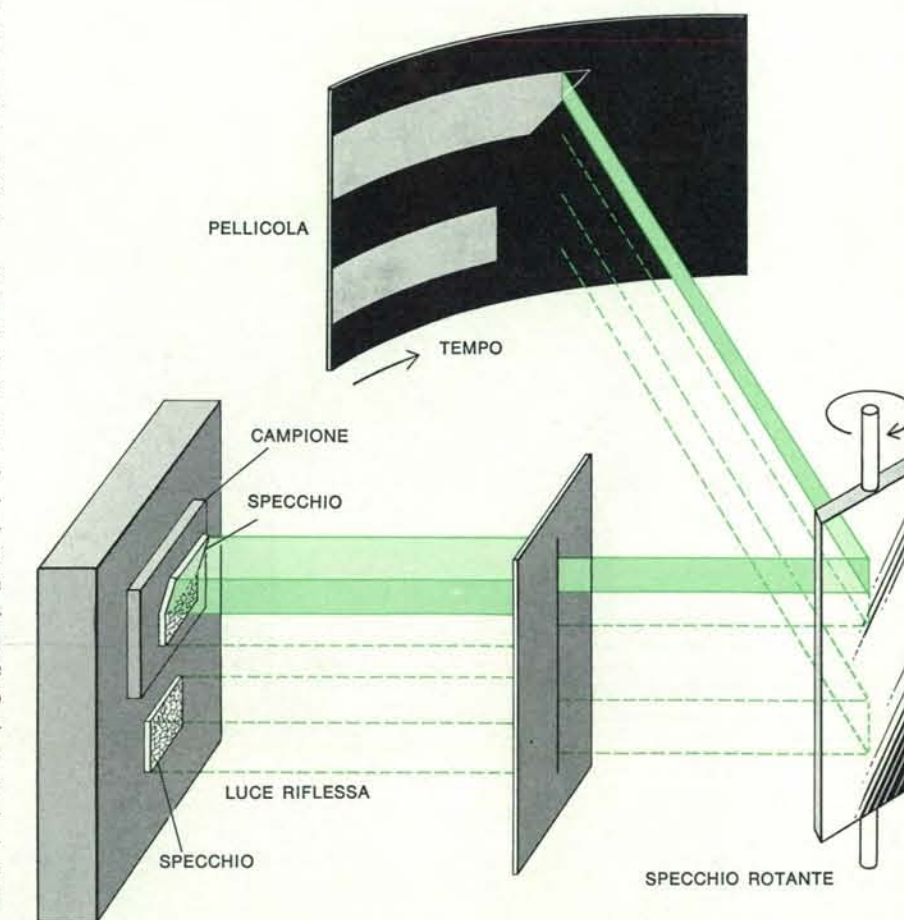
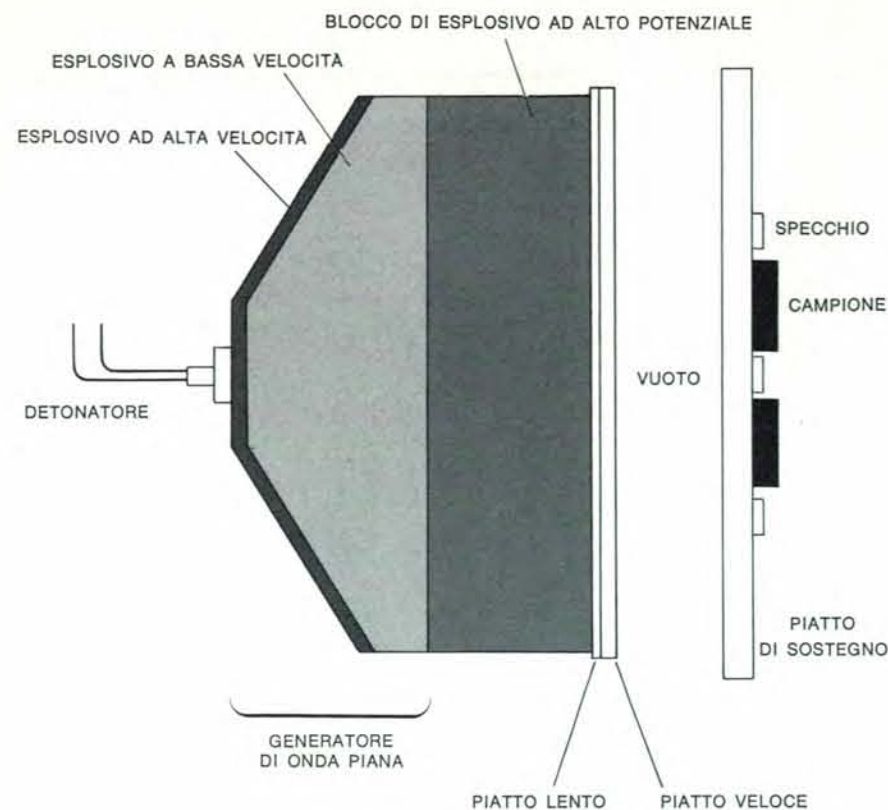
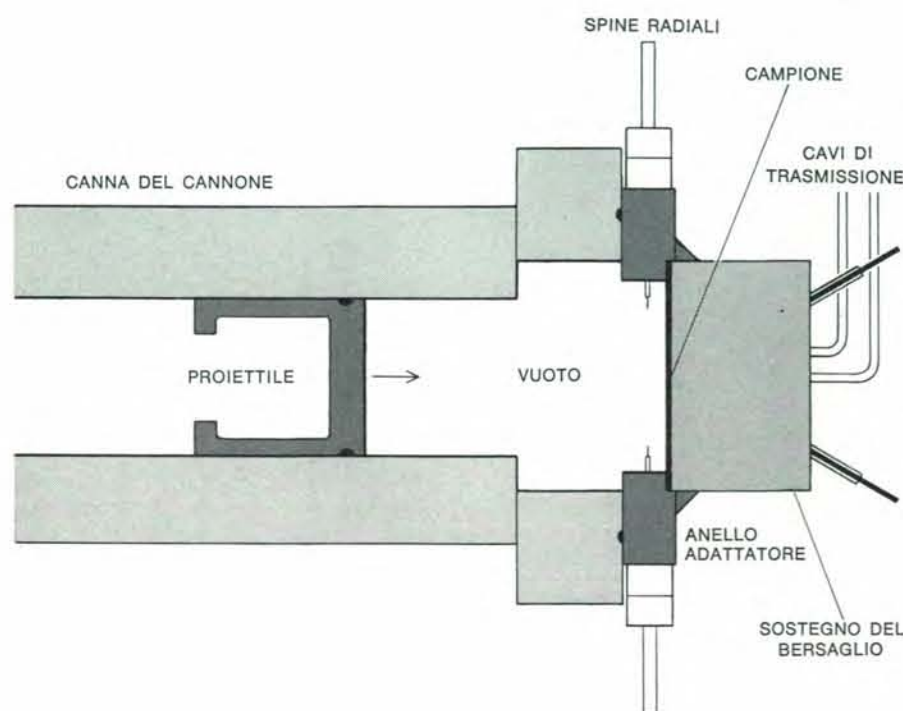
Onde d'urto nei solidi

Quando un'esplosione o un proiettile investono un solido, esso viene attraversato da un'intensa onda di pressione e di sforzo. Onde di questo tipo possono essere usate per lo studio e il trattamento dei materiali

di Ronald K. Linde e Richard C. Crewdson

Un'onda d'urto è un impulso di pressione o di sforzo che attraversa un mezzo con velocità maggiore di quella del suono relativa a quel mezzo, e che produce, nei punti in cui giunge, un aumento di sforzo improvviso, quasi istantaneo. L'onda trasporta una grande quantità di energia, come è ben noto a chi conosca il bang sonico, che è un'onda d'urto di intensità relativamente piccola prodotta da un aereoplano in volo supersonico. Sino a poco tempo fa, il comportamento delle onde d'urto era studiato soprattutto nei gas. Ora, però, le onde d'urto vengono usate per indurre importanti mutamenti nei solidi.

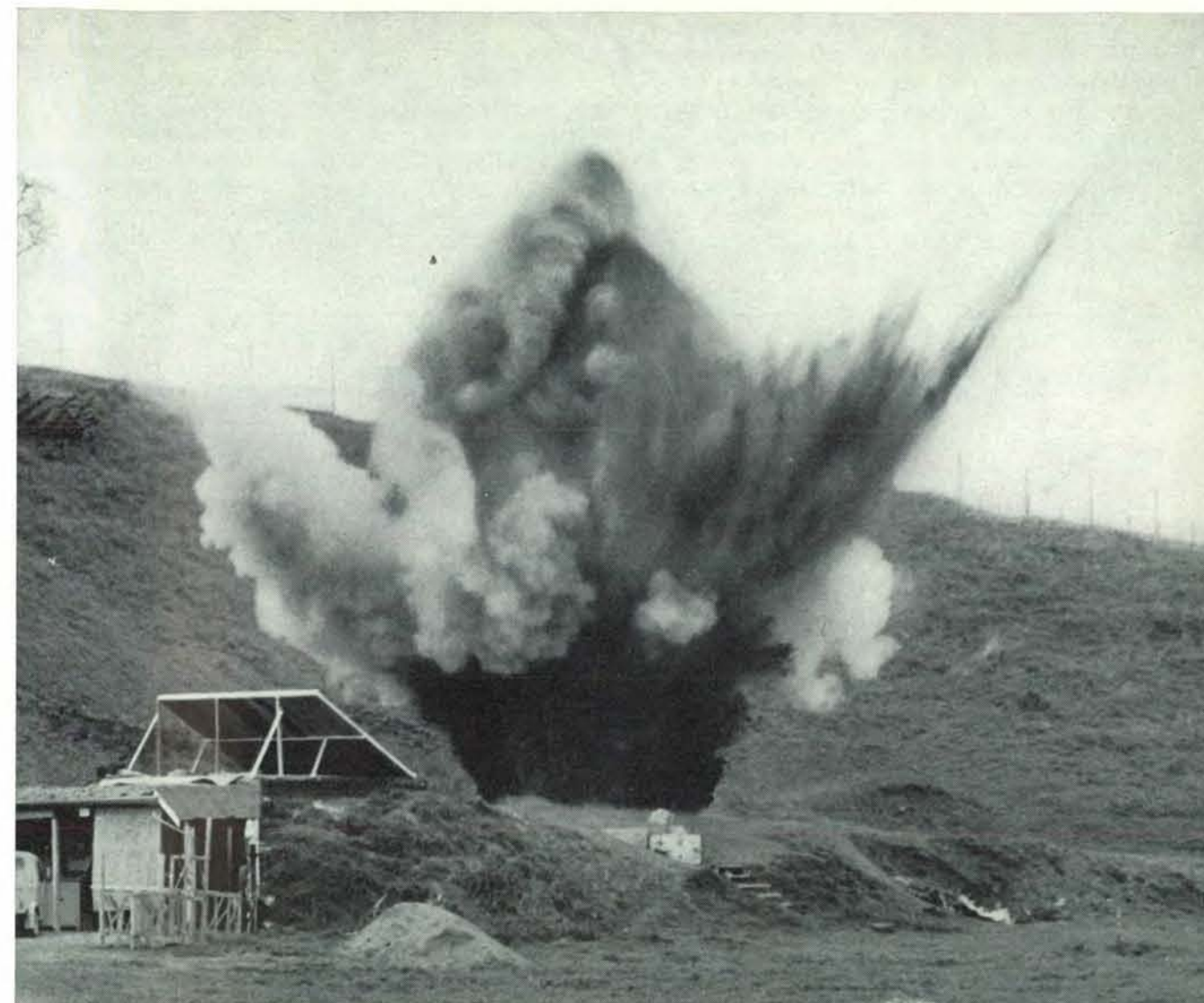
Gran parte dell'interesse per queste esperienze è sorto dai miglioramenti apportati in questi ultimi anni sia alle tecniche di produzione delle onde d'urto nei solidi sia agli strumenti per la registrazione del loro comportamento. Lo studio delle onde d'urto nei solidi ha portato, come risultato, validi contributi alla fisica dei solidi e alla comprensione delle proprietà dei materiali. Inoltre, la capacità così acquisita di controllare con precisione assoluta le condizioni estreme di pressione, temperatura, sforzi di taglio, velocità di deformazione e compressione, create in un solido da un'onda d'urto, ha dato origine a molte applicazioni commerciali. Tra gli esempi piú significativi sono la conversione diretta della grafite in diamante, la creazione di nuove forme polimeriche e la possibilità di saldare, con una sola onda d'urto, due strati di materiale in pochi milionesimi di secondo.

Il nostro gruppo, che lavora presso il Poulter Laboratory dello Stanford Research Institute, si è occupato sia della ricerca sia delle applicazioni delle onde d'urto nei solidi. Noi produciamo un'onda d'urto in un solido o sparando su di esso un proiettile piatto con un cannone a gas, o facendo detonare un esplosivo che può essere a diretto contatto del campione da studiare o a contatto di un piatto metallico che viene scagliato dall'esplosione contro il campione. Alcune delle alterazioni causate dal passaggio dell'onda nel solido

Nel metodo di osservazione mediante riflessione la luce, emessa da un'intensa sorgente, viene riflessa da specchi montati sul campione e sul piatto di sostegno. La luce riflessa attraversa la fenditura e giunge a uno specchio rotante che analizza molto velocemente l'immagine della fenditura e la trasmette a una pellicola fotografica.

Tipico sistema per generare un'onda d'urto basato su un'esplosione. La forma conica dell'esplosivo a contatto del detonatore è proiettata in modo tale che il fronte della detonazione si disponga su un piano prima di raggiungere il blocco di esplosivo ad alto potenziale. In questo modo il piatto che funge da proiettile può essere diretto in maniera da colpire proprio frontalmente il congegno che costituisce il bersaglio.

Un altro metodo per generare un'onda d'urto in un solido è il cannone a gas, che spara un proiettile piatto contro il campione. Con questo sistema è possibile controllare il moto e la velocità del proiettile in modo più preciso di quanto si possa fare con un sistema a esplosivo. Spesso, però, il metodo a esplosivo genera urti più intensi.

sono cosí labili da dover essere osservate e misurate in meno di un milionesimo di secondo; altre sono piú durature e possono essere studiate nei campioni recuperati dopo l'urto.

Sotto molti aspetti, il comportamento di un'onda d'urto in un solido è del tutto simile a quello di un'onda d'urto in un gas o in un liquido. La differenza principale è che le pressioni di urto raggiungibili nei solidi sono estremamente piú elevate di quelle raggiungibili nei gas e sensibilmente piú elevate di quelle che si ottengono nei liquidi. Benché i solidi e i liquidi siano usualmente considerati incomprimibili, è possibile con le attuali tecniche di urto comprimerne molti sino a piú del doppio della loro densità normale. A queste condizioni estreme, anche la resistenza dell'acciaio è nella maggior parte dei casi trascurabile. Il passaggio di un'onda d'urto in un solido può alterare il reticolo atomico, modificare la configurazione degli elettroni attorno agli atomi, cambiare le proprietà fisiche del materiale e modificare il bilancio energetico interno.

Si può rendere intuitivo ciò che accade quando un'onda d'urto attraversa un solido, ricorrendo all'analogia di un treno le cui carrozze siano agganciate l'una all'altra mediante molle anziché mediante i soliti ganci anelastici *(si veda la figura a pagina 78)*. Le carrozze rappresentano gli atomi del solido e le molle l'interazione elastica fra di essi. Se due treni di questo tipo dovessero scontrarsi, ciascuno di essi verrebbe attraversato da un'onda d'urto che sarebbe sostanzialmente lineare, cioè unidimensionale. L'onda si muove a una velocità molto piú grande di quella delle singole carrozze.

Come è suggerito dalla figura, le quantità importanti della fisica delle onde d'urto sono la velocità dell'urto, l'aumento di velocità impresso dall'urto agli atomi o alle particelle, la densità delle particelle e lo sforzo assiale, cioè la componente dello sforzo nella direzione di propagazione dell'urto. Dalle leggi di conservazione della massa e della quantità di moto si possono ottenere due semplici equazioni, dette equazioni di Hugoniot, che legano fra loro queste quattro quantità: la densità iniziale moltiplicata per la velocità dell'urto è uguale alla densità durante la compressione moltiplicata per la differenza fra la velocità dell'urto e la velocità della particella [$\rho_0 U = \rho(U - u)$], e lo sforzo assiale è uguale al prodotto della densità iniziale, della velocità dell'urto e della velocità della particella [$\sigma = \rho_0 U u$]. Per un dato materiale la densità iniziale è fissa, per cui queste equazioni contengono quattro variabili; basta allora misurarne due qualsiasi per essere in grado di calcolare le altre due.

La detonazione di un congegno simile a quello della figura in alto a fronte produce una notevole esplosione. Questa distrugge il congegno, ma non prima che le reazioni del campione nei primi istanti siano state fotografate dall'interno del bunker.

Il fronte d'urto è quella parte dell'onda che è responsabile della compressione. Dietro il fronte d'urto vi è una regione in cui lo sforzo diminuisce velocemente rispetto al suo massimo valore. Questa parte dell'impulso è detta fronte di rarefazione. Le rarefazioni trasmettono al resto del materiale ogni diminuzione di sforzo che abbia luogo in una sua parte, per esempio in uno spigolo che, deformandosi, provoca una diminuzione di sforzo. Di solito si fa anche l'ipotesi che i processi d'urto e di rarefazione siano adiabatici, cioè che avvengano cosí rapidamente da rendere impossibile qualsiasi flusso di calore, anche se si possano avere notevoli variazioni di temperatura in conseguenza della conversione di una forma di energia in un'altra.

Per semplificare l'analisi teorica e capire un buon numero degli effetti non banali che si producono, è di notevole importanza poter considerare il solido che si studia come unidimensionale. Da quanto ora diremo si capirà perché è opportuno procedere in questo modo. Un campione tipico è una lastra di materiale di larghezza e lunghezza maggiori dello spessore; potrebbe per esempio essere larga e lunga parecchi centimetri e spessa un centimetro. Un'onda d'urto ha, trasversalmente alla sua direzione di propagazione, una estensione finita che supponiamo uniforme; quando essa attraversa lo spessore della lastra le rarefazioni che hanno origine agli spigoli tendono a propagarsi verso il centro e in generale questo è un effetto sensibile, poiché la lastra ha un'estensione finita. Tuttavia, dato che nel nostro caso lo spessore della lastra è piccolo rispetto alla sua estensione, il « messaggio » proveniente dagli spigoli in realtà non raggiunge il centro durante il tempo impiegato dall'urto ad attraversare lo spessore della lastra, cosicché si ha lo stesso effetto che si avrebbe se la lastra (e anche l'impulso dell'urto) fosse infinitamente estesa. Di conseguenza, in ogni parte della lastra si hanno gli stessi sforzi che nelle parti vicine, e quindi in ogni parte si ha la stessa deformazione che in quelle vicine. Questo può avvenire solo se la deformazione ha luogo unicamente nella direzione dell'impulso d'urto, e quindi chi fa l'esperimento può efficacemente limitarsi a considerare una situazione unidimensionale.

Le condizioni al contorno che ci permettono di trattare il solido come se fosse unidimensionale sono dette condizioni di urto piano. Si possono produrre onde d'urto piane nel modo piú efficace sia con un cannone a gas, che rende possibile controllare con precisione il comportamento del proiettile da sparare contro il bersaglio, sia facendo detonare un particolare sistema esplosivo generatore di onde piane (*si vedano le figure a pagina 76*). Negli esperimenti d'urto si misura solo lo sforzo assiale; agli sforzi laterali si può risalire tenendo conto delle proprietà del materiale.

La misura delle rapide trasformazioni che hanno luogo in un solido durante il passaggio di un'onda d'urto richiede un buon numero di apparecchi sensibili e veloci nella risposta. Lo sforzo d'urto, per esempio, può essere misurato con trasduttori di sforzo. Il piú versatile strumento di misura degli sforzi ora disponibile è stato messo a punto allo Stanford Research Institute, e è fatto di manganina, una lega che contiene l'84 % di rame, il 12 % di manganese e il 4 % di nichel. Questa lega è particolarmente utile poiché la sua resistenza elettrica varia in modo direttamente proporzionale allo sforzo che in essa si esercita, ma è sostanzialmente indipendente dalla temperatura. Mediante questo strumento è possibile registrare i valori assunti dallo sforzo in istanti diversi; la risoluzione può normalmente giungere sino a 10^{-8} secondi.

Gli effetti di un'onda d'urto sono mostrati in questo modello a treno, ove le carrozze stanno per gli atomi di un solido e gli agganciamenti a molla stanno per l'interazione fra gli atomi. Il treno di sinistra *(1)* fa parte di un proiettile che colpisce un bersaglio solido. Durante la collisione *(2)* le molle sono compresse e le carrozze di ogni treno si addensano in uno spazio piú stretto. Un fronte d'urto *(frecce colorate)*, che trasmette la compressione da carrozza a carrozza, si muove a una velocità molto piú alta di quella di ogni singola carrozza compresa nella regione dell'urto *(carrozze di colore chiaro)*. Quando il fronte d'urto raggiunge l'estremità del proiettile *(4)*, comincia a muoversi in direzione opposta una rarefazione o onda di scarico *(frecce nere)*. Un fenomeno analogo ha luogo quando l'onda d'urto, attraversato il bersaglio, ne giunge alla fine. Dove si incontrano le due onde di rarefazione *(9)* si crea una tensione *(linea tratteggiata)*: se è abbastanza intensa, può causare una rottura *(10)*. Se la molla, prima di spezzarsi, è in tensione, trasmetterà onde di tensione *(11)* che possono provocare altre rotture. Alla fine i due treni si separano *(12)* poiché, non essendo agganciati, non vi è nulla che possa contrastare una tensione applicata nel loro punto di contatto. In questo schema si sono ignorate le oscillazione retrostanti ai fronti di tensione.

La velocità dell'urto può essere misurata elettronicamente o otticamente registrando il tempo impiegato da un urto ad attraversare un dato spessore di materiale. Nelle tecniche ottiche si fa spesso uso di una « macchina fotografica a striscia », che registra una immagine « analizzata » alla velocità di 72 000 chilometri all'ora su una striscia di pellicola fotografica (*si vedano le figure alle pagine 74 e 75*). Sulla pellicola viene impressa la luce riflessa da specchi montati sul campione e sul piatto che lo sostiene. Quando un'onda d'urto raggiunge uno specchio, questo non riflette piú. La fotografia fornisce una registrazione continua dell'intensità della luce riflessa dallo specchio durante un certo periodo di tempo; la risoluzione è dell'ordine di 10^{-7} secondi e anche superiore. (L'onda di urto manda naturalmente in frantumi lo specchio, ma non prima che questo abbia fornito l'informazione desiderata.) Come si possa mediante queste fotografie misurare la velocità dell'urto può essere esemplificato dall'esame delle due strisce brillanti a estremità verticali che compaiono in cima alla figura di pagina 74. La striscia piú in alto proviene da uno specchio montato su un piatto che sosteneva diversi campioni; quella piú in basso da uno specchio montato su un campione. La differenza fra la lunghezza delle due strisce è connessa col tempo impiegato dall'onda d'urto per attraversare il campione e quindi con la velocità dell'urto.

Benché delle quattro quantità fondamentali che compaiono nelle equazioni di Hugoniot lo sforzo e la velocità dell'urto siano piú facilmente misurabili, spesso è necessario misurare anche la velocità delle particelle o la densità. I recenti progressi delle tecniche di misura hanno reso possibile la misura diretta della velocità delle particelle, che viene eseguita seguendo il moto di una sottile lamina conduttrice di elettricità immersa in un campione fatto di materiale isolante. La misura viene eseguita ponendo il campione in un campo magnetico e misurando la forza elettromotrice indotta nella lamina quando l'onda d'urto attraversa il campione. Piú comunemente, si risale alla velocità delle particelle da una misura ottica della velocità della superficie del campione. Uno di questi metodi usa un interferometro a laser per individuare il moto della superficie osservando come variano al passare del tempo le frange di interferenza. Un altro impiega la macchina fotografica a striscia per osservare il comportamento di uno specchio che formi un certo angolo con la superficie del campione. La velocità della superficie del campione può essere calcolata dall'angolo formato dalle strisce quando si interrompono sulla fotografia e dall'angolo di inclinazione dello specchio rispetto alla superficie del campione.

Le relazioni fra la pressione e il volume in un processo d'onda d'urto sono qui descritte nel caso di un materiale solido *(curva nera intensa)* e in quello di un materiale poroso *(curva colorata)*. Le curve di Hugoniot piú scure danno la pressione finale in funzione del volume finale. Le pressioni e i volumi assunti dall'uno o dall'altro dei due materiali durante un processo d'urto con pressione finale *P* giacciono su una curva di Rayleigh *(curva nera sottile)*. La curva di scarico *(linea tratteggiata)*, che è spesso quasi la stessa in entrambi i casi, descrive gli stati in cui il materiale si trova mentre viene percorso dall'onda di rarefazione o di scarico che segue l'urto. Il lavoro durante la compressione indotta dall'urto è dato dall'area al di sotto della curva di Rayleigh.

Le variazioni di densità possono essere osservate con metodi radiografici, facendo uso di un apparecchio per « lampi a raggi X »; si tratta di un sistema di uno o piú tubi a raggi X ad alta corrente che emettono impulsi molto intensi di raggi X; ogni impulso dura 10^{-7} secondi. Questo apparecchio esegue radiografie, simili a quelle mediche, che mostrano le condizioni che si creano all'interno del campione mentre è attraversato dall'urto (*si veda la figura in alto nella pagina seguente*).

Un'altra tecnica di osservazione usa macchine fotografiche ad alta velocità, disposte in modo da riprendere fotografie singole a una velocità che giunge sino a 2,5 milioni di fotogrammi al secondo (con tempi di esposizione di 10^{-7} secondi). Queste fotografie sono utili per osservare un gran numero di fenomeni, per esempio fratture, schizzi (su cui torneremo fra poco) e luminescenza.

In una disposizione sperimentale per l'analisi di un'onda d'urto sono note le condizioni esistenti prima che sia generato l'urto. Si può anche prestabilire la violenza dell'urto disponendo in modo opportuno il cannone a gas o la qualità e la quantità dell'esplosivo che si usa. Gli stati che si possono ottenere in un dato materiale usato come bersaglio, in conseguenza di un'onda di

urto regolare, si dispongono sempre lungo una sola curva (quando si rappresenta lo sforzo in funzione del volume), che è unica quando siano fissate le condizioni iniziali. Questa curva è detta di Hugoniot.

La curva di Hugoniot diventa usualmente piú ripida al crescere della pressione *(si veda l'illustrazione a pagina 79)*. Questa forma è conseguenza del fatto che piú alta è la pressione, maggiore è l'incremento di sforzo necessario per comprimere il materiale sino a diminuirne il volume di una data quantità fissa. Al diminuire della comprimibilità, diventa piú elevata la velocità di un'onda sonora o di un piccolo impulso di pressione che attraversa il materiale. Se quindi un'onda d'urto partisse come una successione di onde, ciascuna aumentata rispetto alla precedente di una piccola quantità, ognuna di queste si troverebbe a viaggiare in un mezzo un po' piú compatto che non quelle che l'hanno preceduta, e tenderebbe quindi a sorpassarle. Tuttavia questa successione di incrementi non può continuare indefinitamente, poiché in un solido esistono condizioni quali la viscosità e l'inomogeneità del materiale che limitano questo processo.

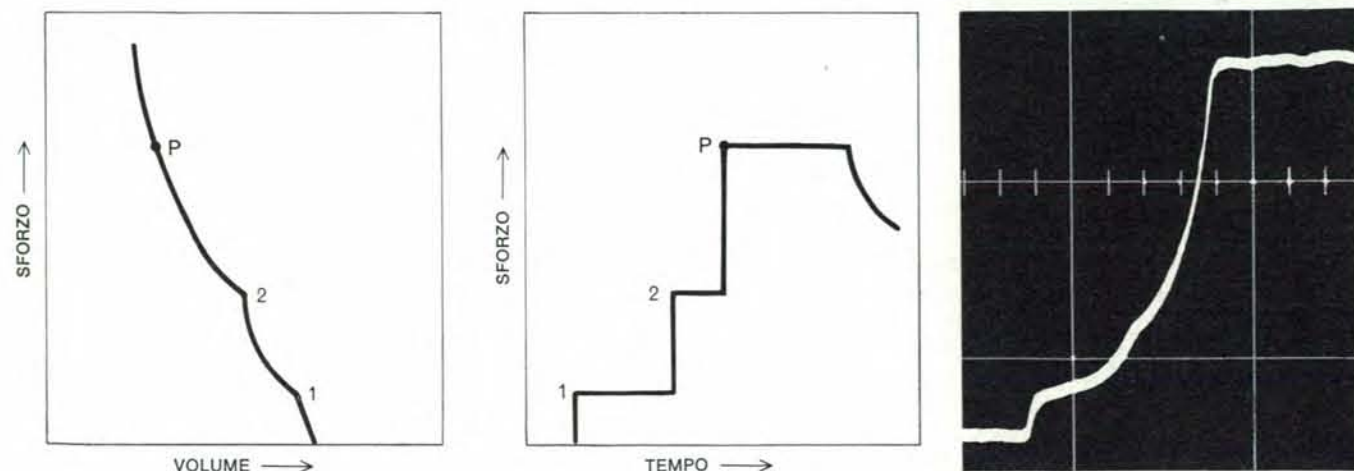
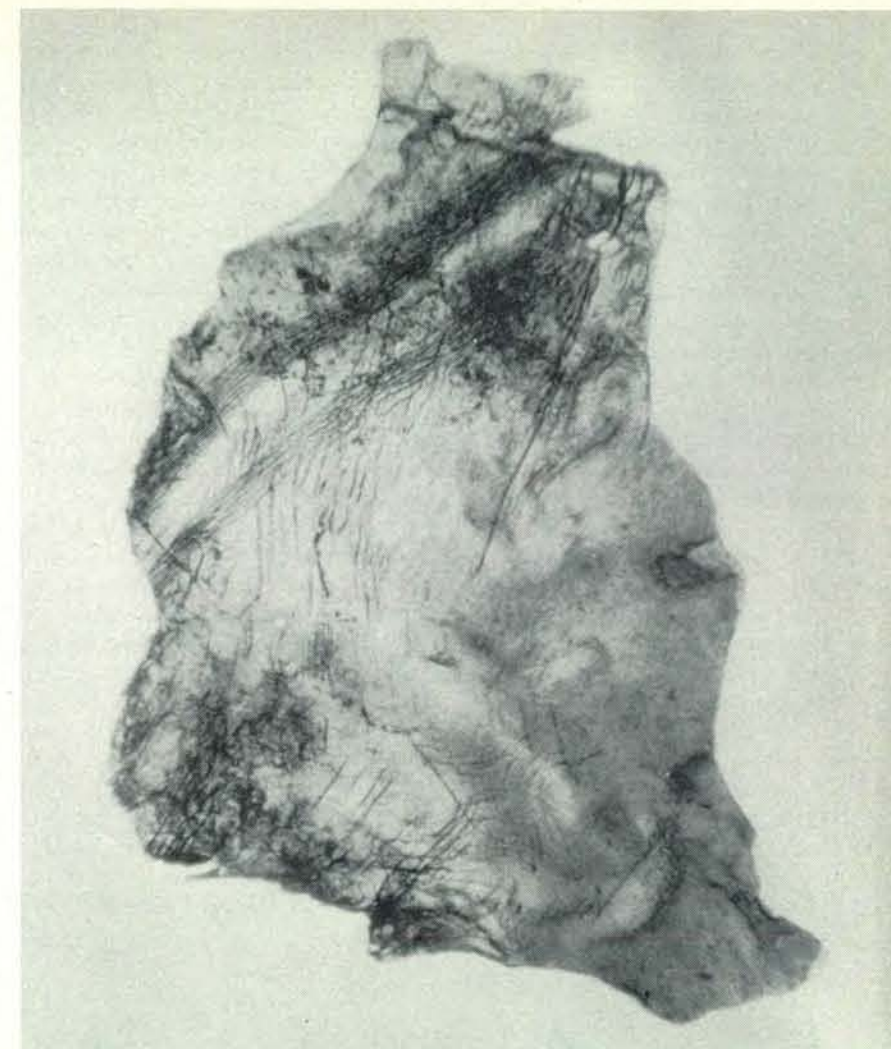
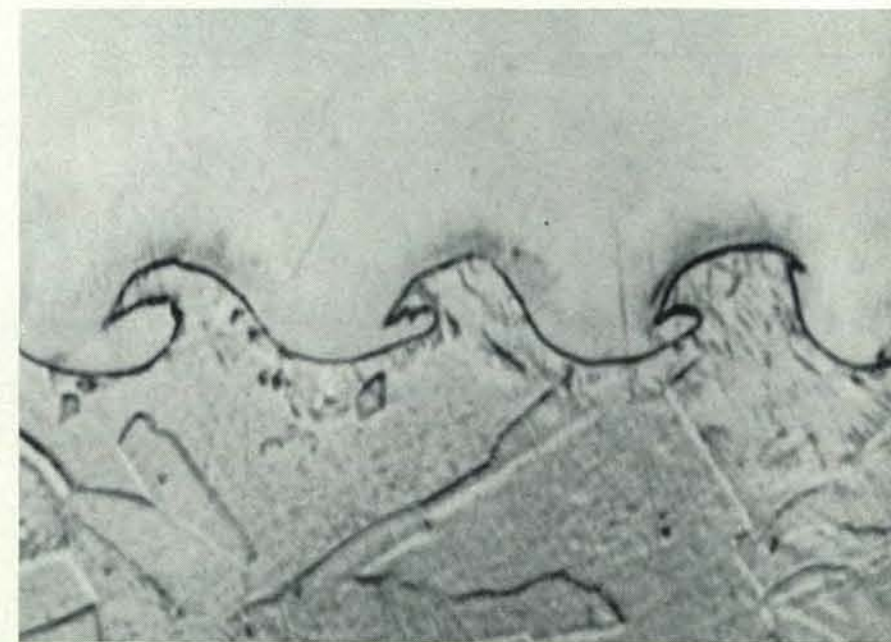
L'aumento di energia interna, e quindi di temperatura, di un materiale compresso dall'urto dipende in larga misura dalla compressibilità e dal calore specifico. Per un'onda d'urto della pressione di 500 000 atmosfere, per esempio, l'aumento di temperatura sarebbe inferiore a 200 °C per un materiale relativamente incomprimibile, per esempio il tungsteno, ma raggiungerebbe all'incirca i 10 000 °C per lo ioduro di cesio, che si comprime sino a quasi il doppio della sua densità originale. Per una data pressione d'urto e un dato materiale si possono ottenere aumenti di temperatura superiori aumentando artificialmente la comprimibilità della sostanza, per esempio rendendola porosa.

Un effetto fisico di cui occorre tener conto negli esperimenti sulle onde d'urto è la tensione che si crea nel punto in cui un'onda di rarefazione che ha origine in una faccia o in uno spigolo del materiale interseca l'onda di rarefazione che viene subito dopo il fronte d'urto. La tensione può essere abbastanza forte da rompere la lastra bersaglio e quindi costituisce una fonte di preoccupazione se si vuole recuperare il campione dopo l'urto. Un modo per risolvere questo problema è quello di circondare il campione con una « trappola di quantità di moto », cioè con un materiale di sostegno disposto in modo tale che le onde di rarefazione si incontrino solo nella trappola e non possano giungere sino al campione. Questa idea è semplice in linea di principio, ma in pratica è difficile costruire una perfetta trappola per quantità di moto.

Tenendo presente che con l'attuale tecnica delle onde d'urto è possibile in molti solidi raggiungere per brevi periodi pressioni d'urto sino a parecchi milioni d'atmosfere, temperature sino a decine di migliaia di gradi centigradi, velocità di sforzo sino a 10^8 al secondo e tensioni trasversali vicine agli estremi limiti teorici, non è affatto stupefacente che le onde d'urto alterino la natura e le proprietà dei materiali. In realtà sono sufficienti condizioni di urto molto meno severe di quelle dette per produrre molti degli effetti piú significativi. La qualità e l'entità degli effetti che hanno luogo sono notevolmente influenzate non solo dagli sforzi massimi che risultano dall'urto, ma anche dalla forma e dalla durata dell'impulso d'urto, dall'aumento di temperatura e dalle condizioni sperimentali.

I metodi d'urto sono un modo conveniente, e talvolta l'unico sinora disponibile, per produrre e studiare le trasformazioni di fase o la struttura cristallina di un materiale. Con questa tecnica è stato possibile trovare una fase prima sconosciuta del ferro e mediante gli esperimenti d'urto è stata suggerita recentemente l'esistenza di un'altra fase del ferro, di cui non ci si aspettava l'esistenza. È di notevole interesse teorico che tali variazioni della struttura cristallina possano prodursi nel periodo di tempo di un'esperimento d'urto, che è piú breve di un microsecondo.

Un interessante esempio di trasformazione indotta dall'urto si ha nel biossido di titanio, un composto molto usato come pigmento nelle vernici e negli smalti. Normalmente questo composto si trova in una di queste tre strutture cristalline: rutilo, ottaedrite (anatasio), brookite. Misure eseguite durante esperimenti d'urto hanno mostrato che quando il rutilo è colpito da un urto di grande pressione, si muta in una forma di biossido di titanio che è circa il 20 % piú densa di ogni forma

Un'onda d'urto può venir osservata mentre attraversa un solido mediante uno strumento a raggi X che scatta una serie di fotografie a intervalli di tempo di 10^{-7} secondi. In questo caso, l'onda d'urto è stata ottenuta con un'esplosione: una lastra di esplosivo, che si trovava molto a destra rispetto alla figura, ha impresso velocità a un piatto che ha colpito il campione; il campione è in questo caso di schiuma di poliuretano a strati, con sottili lamine di metallo interposte fra strato e strato per aumentare il contrasto nella radiografia. La scala di calibrazione sullo sfondo serve per valutare le variazioni di densità del campione.

Le proprietà dei materiali vengono descritte mediante curve. Le curve di Hugoniot *(a sinistra)* indicano il limite di elasticità del materiale *(1)* e una transizione di fase *(2)*. Se nell'urto il materiale venisse compresso sino alla pressione *P*, una misura dello sforzo che in esso sarebbe presente fornirebbe la curva semplificata al centro, ove la pressione è funzione del tempo; i gradini corrispondono ai punti a cuspide presenti nella curva di Hugoniot. L'effettiva forma dell'onda, registrata da uno strumento di misura a manganina, è mostrata a destra come appare sullo schermo di un oscilloscopio a raggi catodici.

Questa scaglia di diamante, che ha una lunghezza massima di circa un millimetro e è spessa circa 50 micron, è stata creata investendo della grafite con un'onda d'urto.

Il rame *(sopra)* è stato saldato al nichel con una tecnica d'urto. Questo metodo di saldatura ha evitato che i due metalli fondessero in corrispondenza delle superfici di contatto, il che si sarebbe verificato se si fossero usati metodi tradizionali di saldatura.

precedentemente nota. L'esatta struttura cristallina di questa fase non è nota, poiché non è stato possibile conservarla abbastanza a lungo da permettere un esame; quando la pressione cessa, la nuova struttura si trasforma o di nuovo in rutilo o in un'altra fase la cui struttura cristallina è la stessa di quella di una forma comune di biossido di piombo. La trasformazione che ha luogo quando cessa la pressione è particolarmente interessante, poiché sembra che l'orientazione dei piani del reticolo cristallino della forma di partenza, rispetto alle direzioni delle onde d'urto e di rarefazione, sia importante nel determinare se sarà il rutilo o la forma del tipo biossido di piombo ciò che si produrrà al cessare della pressione.

A differenza di quanto ora visto, molte delle transizioni di fase che hanno luogo in un materiale in conseguenza di un urto ad alta pressione possono essere preservate a bassa pressione. Un esempio sono i diamanti che si possono ottenere dalla grafite, e sembra anche che essi abbiano risolto una controversia sorta molti anni fa, quando si trovarono dei diamanti nel meteorite di Canyon Diablo che creò il famoso Meteor Crater, o Cratere Barringer, in Arizona. Il problema era se i diamanti si fossero formati nell'urto provocato dalla collisione del meteorite con la Terra, oppure in conseguenza di una alta pressione costante presente nel corpo da cui proveniva il meteorite. Alla fine si eseguí un esperimento risolutivo allo Stanford Research Institute, in cui si dimostrò che con l'urto si possono formare diamanti (con poca spesa e in quantità). Questo esperimento e ulteriori indagini sui diamanti di Canyon Diablo condussero alla conclusione, ora accettata da tutti, che quei diamanti si erano formati durante l'urto provocato dalla collisione del meteorite col terreno.

Un altro esempio di una nuova fase creata per l'urto in un materiale è il Borazone, una forma di nitruro di boro ottenuta ad alta pressione e che non si trova in natura. Il Borazone ha una struttura cristallina e una durezza simili a quelle del diamante e fu scoperto dai tecnici della General Electric nel corso di esperimenti basati su tecniche di alta pressione statica. I cristalliti, cioè le parti cristalline coerenti, che si trovano nel Borazone formato dall'alta pressione statica sono ancor piú grandi dei cristalliti che si formano nell'urto.

Alcuni ricercatori sovietici hanno recentemente comunicato di essere riusciti a usare onde d'urto per polimerizzare un buon numero di monomeri, ottenendo cosí nuove forme polimeriche. Si ha notizia anche della vulcanizzazione di parecchi elastomeri. Benché si possano citare altri esempi di sintesi per urto di nuovi materiali, resta il fatto che questo campo d'indagine cosí promettente è per ora relativamente inesplorato.

Il processo d'urto non porta sempre alla sintesi di un nuovo materiale, ma può indurre alterazioni significative nelle proprietà di un materiale già esistente. Molti metalli e leghe, per esempio, sono resi piú rigidi e resistenti da una deformazione d'urto che da una quantità equivalente di deformazione statica o quasi-statica. Per spiegare questo fatto è probabilmente necessario tenere conto del numero e del movimento delle dislocazioni, che sono incrinature nella regolare struttura cristallina di un materiale. Quando le dislocazioni in un materiale sono mobili, esso è plastico e facilmente deformabile. La mobilità delle dislocazioni può essere ridotta col processo di indurimento, nel quale il materiale è ripetutamente deformato; si crea cosí un maggior numero di dislocazioni (e anche di altre imperfezioni di struttura) che tendono a bloccare il moto di una qualsiasi di esse. Il processo di indurimento può essere eseguito con l'urto, dato che questo può produrre un numero di dislocazioni molto maggiore che qualsiasi altro metodo.

Le dislocazioni e le altre imperfezioni di struttura create dall'urto nella struttura reticolare di un cristallo possono avere effetti che vanno al di là di quelli ora visti, e che ne influenzano le proprietà meccaniche. Queste imperfezioni, per esempio, possono alterare, talvolta profondamente, le proprietà superficiali dei cristalli. Un esempio significativo è costituito da certi catalizzatori che, dopo essere stati sottoposti al processo d'urto, aumentano di due o tre ordini di grandezza la loro velocità d'azione.

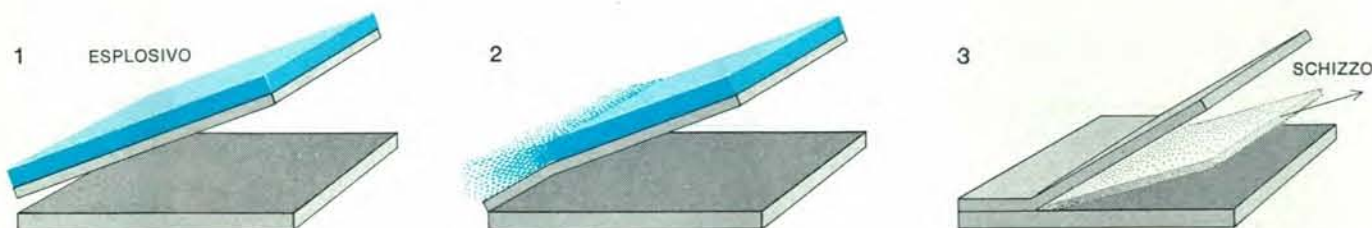
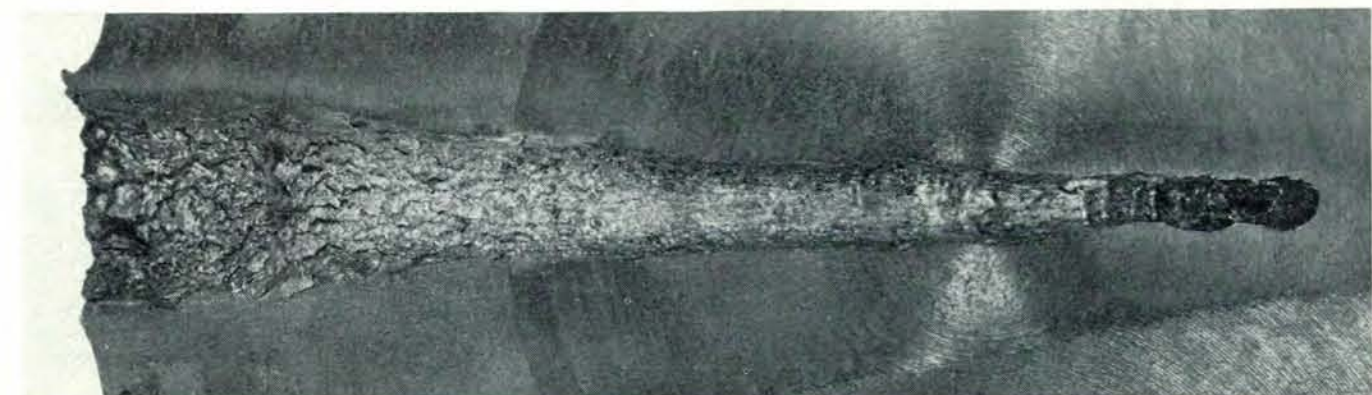
Tra gli effetti transitori delle onde d'urto vi sono le alterazioni delle proprietà elettriche dei materiali. Alcuni materiali che a pressione atmosferica sono isolanti diventano conduttori di elettricità quando sono compressi da un'onda d'urto. Mentre passa l'onda di urto, la nube di elettroni che circonda un nucleo atomico nel materiale viene per un attimo spinta nella nube che circonda un nucleo vicino; si ha di conseguenza un aumento di temperatura e una diminuzione dell'intervallo fra le bande elettroniche; gli elettroni sono quindi spostati dalla banda di valenza, ove non possono condurre elettricità, alla banda di conduzione. Viceversa, materiali che a pressione atmosferica sono conduttori di elettricità, hanno una conduttività che diminuisce molto se sono sottoposti all'urto. Le cause principali di questo comportamento sono di solito l'aumento di temperatura e la creazione di un gran numero di imperfezioni reticolari, che diffrangono gli elettroni di conduzione. (Una diffrazione di elettroni analoga si produce anche negli isolanti, ma a pressioni e temperature molto elevate questo effetto è quasi del tutto trascurabile rispetto allo spostamento degli elettroni alla banda di conduzione.)

Quando un'onda d'urto colpisce due lastre inclinate o una scanalatura in un solido si ha talvolta un effetto sorprendente: si produce uno schizzo fluido o uno spruzzo fatto di minuscole particelle di materiale, dotate di velocità elevata. Per ottenere uno schizzo, le due lastre o le due facce della scanalatura devono formare un angolo tale che 1) lo sforzo dell'urto superi nettamente lo sforzo massimo sostenibile dal materiale, che in tal modo si disgregherà, e 2) il punto di contatto in cui le lastre o le due facce della scanalatura si incontrano si muova a una velocità minore di quella del suono nel materiale che si considera. (Questa « velocità del punto di contatto » dipende dalla violenza dell'urto e dall'angolo fra le due lastre o fra le due facce della scanalatura.) Poiché l'impulso d'urto, inoltre, si muove a una velocità maggiore di quella del suono, esso predispone ogni punto del materiale a divenire fluido, il che avverrà quando le due lastre o le due facce della scanalatura verranno a contatto in quel punto *(si veda l'illustrazione superiore nella pagina a fronte)*. Uno schizzo molto veloce di questo tipo è estremamente efficace per forare degli oggetti. Il processo ora descritto viene usato per scavare condotti nei pozzi petroliferi, e su esso si basano anche le armi a carica sagomata, adatte per bucare corazze metalliche.

Le tecniche basate sugli atti esplosivi vengono sempre piú usate anche nella fabbricazione dei materiali. Fra le loro applicazioni vi sono l'indurimento, il rafforzamento, le saldature, la formatura di metalli lavorati e la compressione delle polveri in blocchi solidi. La formatura di metalli con tecniche esplosive, che consente di forgiare cupole di alluminio fatte di un unico pezzo e del diametro di 3 metri, è l'applicazione piú nota di queste tecniche, ma quella che ora si va piú rapidamente diffondendo è la saldatura con metodi esplosivi. Circa 10 anni fa si trovò, studiando la penetrazione dei proiettili in lastre metalliche, che il proiettile si fondeva con la lastra ogni volta che l'angolo di incidenza era adatto alla formazione di uno schizzo.

Da allora sono stati riconosciuti tre diversi tipi di legame esplosivo. Si può formare un legame diretto, piatto o increspato, se uno schizzo asporta gli ossidi superficiali e i gas di assorbimento, permettendo cosí che abbia luogo una adesione o saldatura a freddo. Un secondo tipo di saldatura si ha quando uno schizzo è intrappolato fra le due parti che si saldano. La differenza piú significativa fra questi due tipi di saldatura è che in questo secondo caso esiste, fra le superfici saldate, uno strato di metallo solidificato. Il terzo tipo di saldatura si ha quando il getto dello schizzo è discontinuo, per cui la superficie di saldatura è increspata, alternandosi tratti di metallo solidificato a tratti ove il legame è diretto.

Uno dei vantaggi principali delle saldature ottenute con metodi esplosivi è che queste sono un modo economicamente abbastanza vantaggioso di creare forti legami anche fra materiali non simili e normalmente incompatibili, come ad esempio l'alluminio e l'acciaio. Molte delle nuove monete a « sandwich » emesse dagli USA sono ottenute in questo modo; dei lingotti di rame vengono prima rivestiti, con una tecnica esplosiva, di una lega di rame e alluminio e poi laminati in fogli su cui infine vengono stampate le monete. Nei casi in cui i metodi tradizionali di saldatura produrrebbero dei composti fragili e comunque indesiderati, o in quelli in cui è dannoso un calore eccessivo, la tecnica esplosiva di saldatura è spesso l'unica che si possa usare. Essa è inoltre probabilmente la tecnica di saldatura piú economica quando si devono saldare oggetti di forma strana o lastre o lamine molto estese. Poiché questa tecnica non richiede una attrezzatura pesante e può funzionare nel vuoto, è presa in considerazione come metodo di costruzione e di riparazione nelle spedizioni spaziali.

In questi ultimi anni si sono sviluppati metodi di studio dei materiali sottoposti a pressioni statiche che giungono sino al valore di 500 000 atmosfere, coprendo cosí parte dell'intervallo di pressioni studiato con i metodi d'onda d'urto. Inoltre, un materiale può essere sottoposto a un'alta pressione statica per un tempo illimitato, mentre in un processo d'urto la pressione di solito dura non piú di 10^{-5} secondi e spesso molto meno. D'altro canto, gli sforzi possono essere applicati e rimossi con una frequenza molto maggiore in un processo d'urto di quanto sia possibile realizzare in un processo d'alta pressione statica. Inoltre, per pressioni superiori alle 150 000 atmosfere, il volume di un campione non può essere molto superiore a un centesimo di centimetro cubo negli esperimenti statici, mentre nei processi d'urto non c'è teoricamente limite alle dimensioni del campione. I metodi statici sono probabilmente piú economici di quelli d'urto per esperimenti su piccola scala, ma la situazione è capovolta quando l'esperimento va eseguito su una grande quantità di materiale. Infine, i metodi d'urto sono l'unico modo per realizzare un gran numero dei fenomeni transitori che abbiamo descritto e per ottenere processi quali gli schizzi e il metodo esplosivo di saldatura. Per questi motivi è lecito aspettarsi che nei prossimi dieci anni le onde d'urto diventeranno sempre piú utili nella ricerca e sempre piú importanti nel trattamento dei materiali già conosciuti e nell'elaborazione di materiali nuovi.

Se due lastre formano un certo angolo l'una con l'altra (*1*) si può formare uno schizzo. Quando si fa detonare l'esplosivo (*in colore*), la lastra soprastante viene schiacciata su quella sottostante (*2*) in modo che la velocità di chiusura sia minore di quella del suono nel materiale in esame. Lo sforzo dell'urto, che supera lo sforzo massimo che il materiale è in grado di sopportare, si propaga a una velocità maggiore di quella del suono e predispone quindi ogni punto del materiale a disgregarsi e a diventare fluido (*3*) quando entrerà a far parte della zona in cui le due lastre entrano in collisione.

Uno schizzo cilindrico ha scavato un buco nell'acciaio. La profondità del buco è di circa 15 centimetri, ma si possono ottenere buchi piú profondi. Uno schizzo provocato da un'onda d'urto è costituito di uno spruzzo di particelle ad alta velocità.

Corna cave e corna piene

Comunemente si pensa che questi due tipi di corna siano simili, ma in realtà esse sono del tutto differenti. Tra l'altro, le corna cave sono formazioni dermiche, mentre le corna piene sono formazioni ossee

di Walter Modell

Alcuni anni fa un direttore della New York Zoological Society ricevette dal Sudafrica un invio di antilopi che aveva aspettato con impazienza. Vi erano rari esemplari quasi sconosciuti a tutti quelli che non si dilettano in giochi di parole crociate: il caama, l'antilope alcina, il cobo, l'impala ed altri. Quando le antilopi furono scaricate dalla nave, il direttore ebbe una sgradita sorpresa: tutti gli animali erano senza corna. Allo scopo di risparmiare spazio e di evitare danni, lo spedizioniere le aveva fatte tagliare pensando che esse sarebbero ricresciute dopo che gli animali fossero stati sistemati nella loro nuova sede. Purtroppo lo spedizioniere aveva commesso un grave errore zoologico, confondendo tra loro corna cave e corna piene. Tutti gli animali della spedizione avevano corna cave, che, come ogni allevatore sa, non si rigenerano dopo essere state staccate. Il direttore, non potendo esporre gli animali mutilati nello zoo e, non trovando nessun altro che li volesse, li fece macellare e dare ai grossi felini, che per la prima volta in tanti anni mangiarono come erano abituati a mangiare in libertà.

Lo sfortunato commerciante di animali, che aveva confuso le corna cave con le corna piene, non era particolarmente ignorante, ma fu vittima di un malinteso molto diffuso. Molte persone e persino libri di consultazione non spiegano chiaramente le differenze tra questi due tipi di corna: queste differenze sono fondamentali e complesse, e presentano interessanti problemi nei campi della biochimica, della fisiologia, del comportamento animale e della evoluzione.

Corna cave, corna piene e simili ornamenti cefalici si trovano oggi solo in cinque famiglie di ungulati (animali provvisti di zoccoli): 1) i Rinoceronti-di, caratterizzati da uno o due corna nasali, permanenti, mediane; 2) i Bovidi (buoi, pecore, capre e antilopi), forniti da un paio di corna cave, permanenti, simmetriche; 3) gli Antilocapridi (antilocapra), con un paio di corna cave simmetriche, caduche; 4) i Cervidi (alce, caribú, cervo e daino), con un paio di corna piene, caduche; 5) i Giraffidi (giraffa e okapia), le cui protuberanze cefaliche permanenti differiscono sia dalle corna cave sia da quelle piene.

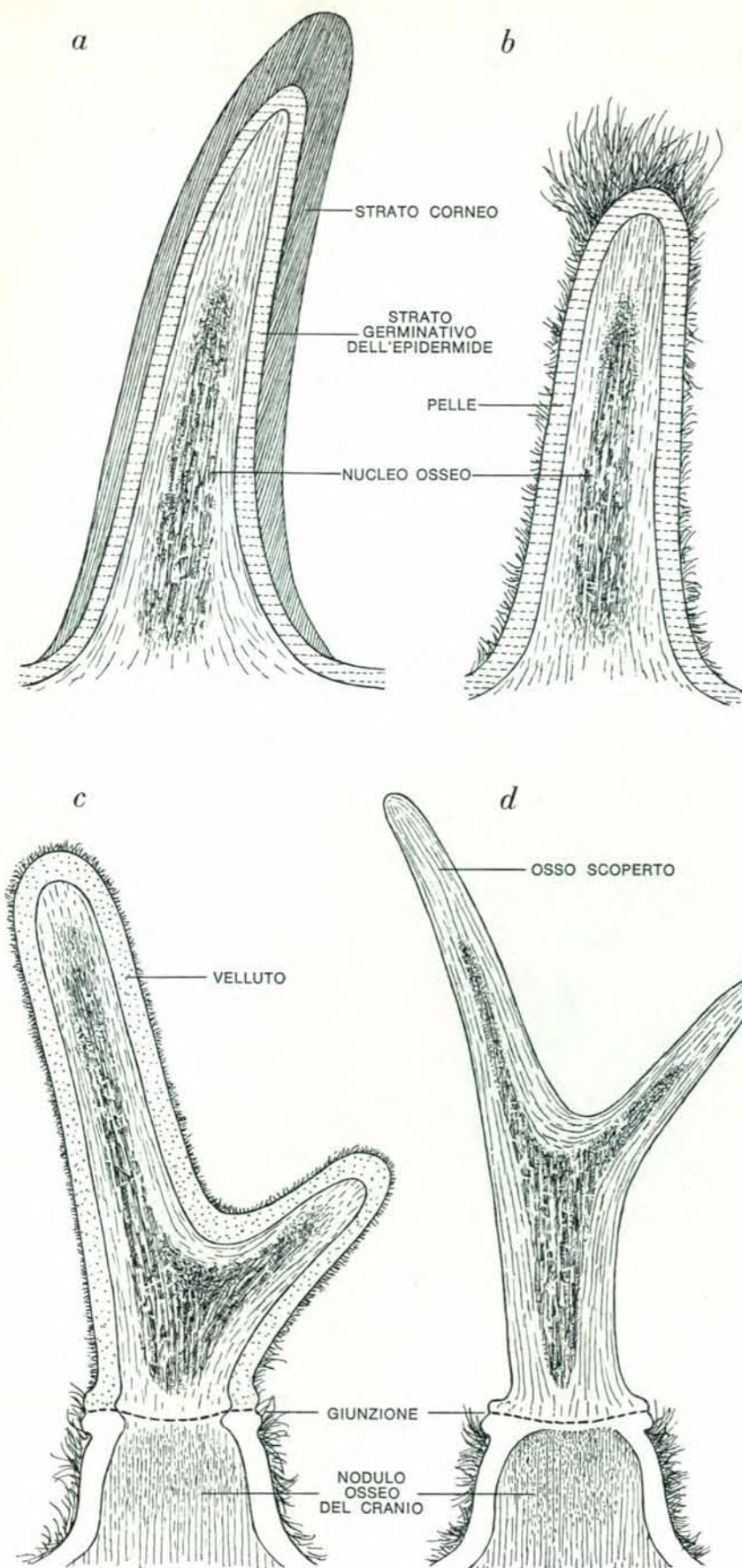
In termini funzionali le corna cave hanno il significato di efficaci strumenti di difesa e di offesa. Le protuberanze sulla testa della giraffa sono piú difficili a interpretare; portate a un'altezza di 5 o 6 metri da terra, esse sono ben difficilmente in una posizione adatta per attaccare qualcosa, eccetto forse un aereo a bassa quota, e oltre tutto sono corte, smussate e vellutate, tanto da non poter fare molto danno. La funzione delle corna piene è ancora piú misteriosa; a parte il fatto che conferiscono un aspetto maestoso all'animale, esse hanno solo una minima utilità, e spesso anzi sono d'impaccio, infatti sono troppo deboli per servire come armi. Quando i Cervidi ingaggiano un combattimento, non si servono delle corna, ma dei loro zoccoli. Per parecchi mesi all'anno, tra la caduta autunnale e la ricrescita, l'animale resta senza corna, e non sembra sentirne la mancanza.

L'unica funzione pratica delle corna piene è che, durante la stagione degli accoppiamenti, sono usate dai maschi per combattere gli altri maschi e poter cosí conquistare le femmine. Spesso questa lotta finisce miseramente; non è raro che i due contendenti incastrino le loro corna, restando entrambi immobilizzati, e muoiano; il branco, in questo modo, perde talvolta proprio i migliori riproduttori. Come vedremo, il corno pieno è uno strano e antieconomico esperimento di natura; paradossalmente nuoce ai suoi possessori e sembra destinato a scomparire.

Nel distinguere le corna piene da quelle cave, noi notiamo, tanto per cominciare, che sono costituite da tessuti diversi. Le corna cave sono formate principalmente da cheratina, la proteina dei capelli, delle unghie, degli zoccoli, delle squame, delle penne, degli artigli e di altre strutture cornee derivate dal tessuto epidermico. Come i capelli e le unghie, non sono un tessuto vivente e sensibile; non hanno nervi né circolazione sanguigna e per questo motivo sono insensibili al dolore e non sanguinano quando sono tagliate.

Durante l'accrescimento dell'animale le corna cave aumentano lentamente di dimensioni e raggiungono la loro grandezza e forma definitive mediante la formazione di un astuccio corneo di origine epidermica che circonda un nucleo osseo, l'*os cornu*, alla base dell'osso frontale del cranio. Se l'astuccio corneo viene tagliato non può piú rigenerarsi.

Le corna piene, al contrario, sono un tessuto vivente che assomiglia sia fisiologicamente, sia per composizione chimica e struttura cellulare, a un vero e proprio tessuto osseo. Durante lo sviluppo queste corna sono coperte da una cute pelosa, chiamata velluto, riccamente vascolarizzata e innervata. Nel periodo in cui queste corna sono ricoperte dal velluto, sanguinano abbondantemente quando sono ferite e sono sensibili al tatto e al dolore. A questo stadio le corna piene non solo sono tenere ma anche fragili. Col passare del tempo il tessuto osseo prolifera, il velluto cade e rimangono allo scoperto le impalcature ossee.

Esemplari tipici di corna cave e di corna piene, viste di fronte e di lato. In alto le corna cave del kudu, una grande antilope diffusa in molte regioni dell'Africa. In basso le corna piene del caribú, che è l'equivalente nord-americano della renna.

Struttura interna delle corna cave e di quelle piene in un corno cavo di bovino (*a*), nella protuberanza di una giraffa (*b*) e nel corno pieno di un cervo, ancora coperto dal « velluto » (*c*) e con la struttura ossea scoperta (*d*) dopo che il velluto si è staccato. È indicata la giunzione col cranio, dove la crescita inizia in primavera e dove il corno si stacca al tempo della muta annuale. Le corna piene durante l'accrescimento hanno vasi sanguigni e nervi, mentre le corna cave ne sono del tutto sprovviste.

Alla fine della stagione degli amori (generalmente in dicembre nelle regioni temperate dell'emisfero settentrionale) l'animale perde le sue corna, e quattro o cinque mesi piú tardi (in aprile o maggio) un nuovo paio incomincia a spuntare. Le corna piene sono quindi un organo deciduo: cadono e rispuntano ogni anno come le foglie di un albero.

I due tipi di corna differiscono notevolmente anche per l'aspetto esterno. Le corna piene sono di solito complesse e ornate. Esse normalmente sono due, benché in alcune specie non siano simmetriche. In alcuni animali come la renna e l'alce, le corna piene hanno una struttura palmata a forma di ala. Di anno in anno, dopo che un cervo è divenuto adulto e finché non raggiunge il suo massimo sviluppo, ogni nuovo palco di corna diviene piú grande e piú elaborato, mentre aumentano le ramificazioni e le « punte », che stanno a indicare l'età e il vigore dell'animale. Il numero delle punte determina anche i criteri i bellezza per un cervo; in Scozia, per esempio, un cervo con dodici punte è chiamato cervo reale. In alcune specie di Cervidi, ora estinte, le corna pesavano piú dell'intero scheletro dell'animale. In contrapposizione il piccolo pudu delle Ande cilene, un cervo rossastro, alto circa 30 cm soltanto, ha semplici corna piene, molto piccole, costituite da punte quasi invisibili, lunghe dai 5 agli 8 cm.

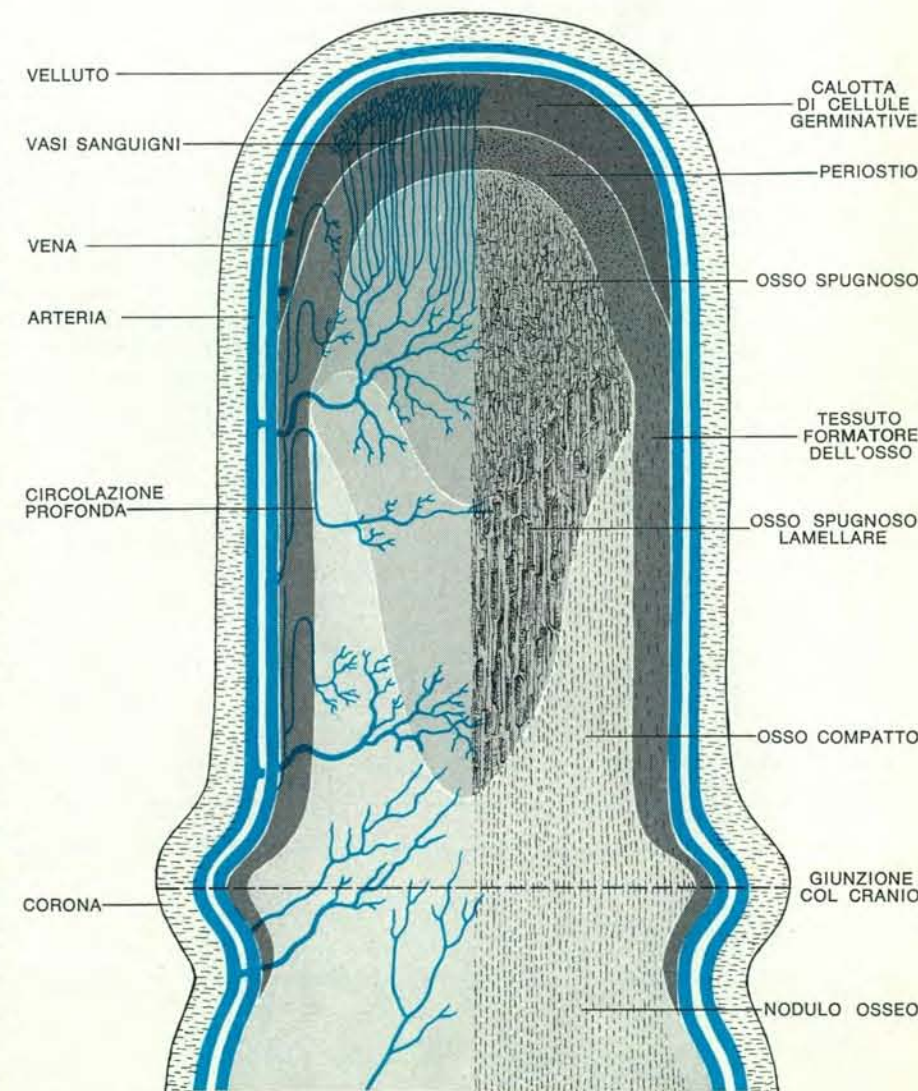
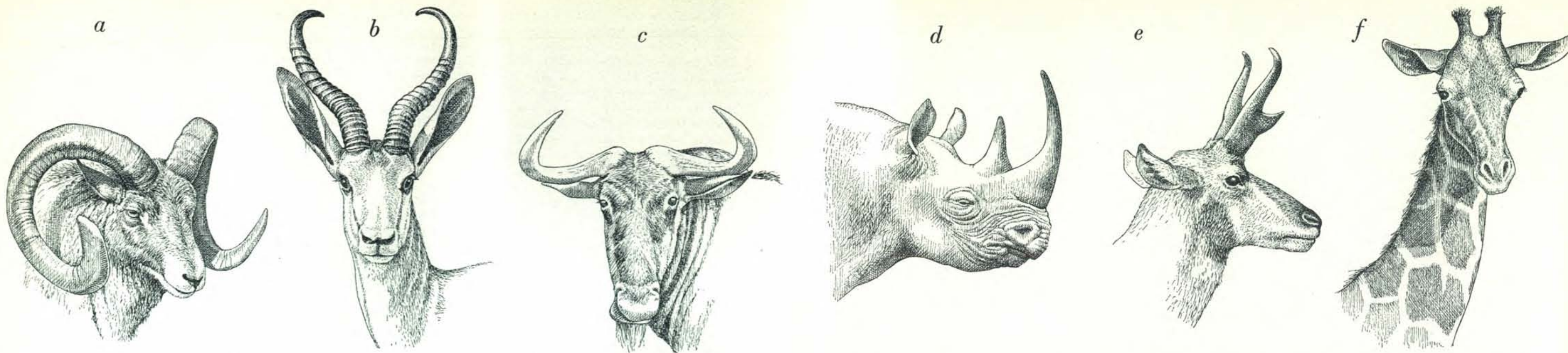
Le corna cave dei Bovidi, benché possano anche essere splendide, sono chiaramente conformate per essere piú utili che ornamentali. Queste corna sono sempre due, simmetriche (tranne in una specie di antilope con quattro corna simmetriche), di varie forme: curve, ritorte, attorcigliate, a spirale e a zig zag. Tutte queste corna terminano con un'unica robusta punta capace di infilzare o di lanciare in aria un avversario. (A testimonianza del formidabile potere delle corna come armi, è stata eretta fuori dell'Arena di Madrid una statua a Sir Alexander Fleming, lo scopritore della penicillina, l'antibiotico che ha ridotto il tasso di mortalità fra i matador colpiti.) Sembra significativo anche il fatto che in quasi tutte le specie di Bovidi la femmina possieda le corna, come il maschio (benché esse siano spesso piú piccole), mentre tra i Cervidi le corna sono caratteri sessuali secondari del maschio (l'unica eccezione che si conosca è data dalla renna e dalla sua varietà americana, il caribú). Questo fatto sembra provare che il corno pieno, diversamente dal corno cavo, non si sia evoluto originariamente come arma di difesa.

Esaminiamo ora in modo piú preciso le distinzioni biologiche ed evolutive tra corna cave e corna piene. Il corno cavo è costituito da filamenti simili a peli che nascono da papille del derma molto simili ai follicoli piliferi. È chiaro tuttavia che il corno cavo non è, come talvolta è stato definito, semplicemente una massa di peli agglutinati. All'osservazione microscopica, si può vedere che è costituito da filamenti cavi, mentre le fibrille del pelo sono piene. Inoltre le corna cave ebbero un'origine molto piú antica (apparirono almeno 50 milioni di anni prima) dei peli, che si svilupparono in modo evidente solo dopo l'apparizione dei Mammiferi.

Il corno cavo piú semplice e primitivo attualmente è il corno di rinoceronte; esso è costituito da filamenti tubulari secreti dalla pelle, cementati assieme in modo da formare una sporgenza sul naso dell'animale. Non avendo un nucleo osseo, il corno è fatto interamente di cheratina. Durante l'accrescimento, si cementa all'osso nasale, ma se si scuoia la testa di un rinoceronte morto, il corno viene via spesso insieme alla pelle, a cui è attaccato saldamente. Nei buoi e negli altri animali della famiglia dei Bovidi le corna sono cave e infilate, come una scarpa, direttamente sull'appuntito *os cornu*, che si innalza dall'osso frontale del cranio. Esse sorgono da uno strato epidermico piú profondo (*stratum germinativum*) immediatamente sovrastante l'*os cornu*. Questo strato riveste il corno, e procura la sua lenta crescita continuando a secernere filamenti. Per questo motivo un cavicorno non può ricostruire le corna tagliate, il taglio infatti distrugge i tessuti epidermici adibiti alla secrezione dei filamenti. L'unico animale munito di corna cave che cambia le sue corna periodicamente è l'antilocapra (*Antilocapra americana*), originaria dell'America del nord, un tempo abbondante, ma poi quasi sterminata dai cacciatori prima che venissero prese serie misure per tutelare la specie. Ogni anno l'antilocapra si costruisce un paio di vere e proprie corna cave, formate da un astuccio di cheratina che riveste l'*os cornu*. Le nuove corna possiedono una punta in piú di quelle dell'anno precedente.

Il processo di caduta delle corna di questo animale non può essere paragonato all'annuale cambio delle corna piene. Il nuovo corno cresce mentre il vecchio è ancora al suo posto e lo scalza dall'*os cornu* quando raggiunge il pieno sviluppo, cosicché l'animale non è mai senza corna. Il corno della antilocapra differisce dalle corna caratteristiche dei Bovidi, perché è spesso coperto da abbondanti peli. Comunque questo animale è talmente simile in tutte le caratteristiche fisiche ai membri della famiglia dei Bovidi che ritengo possa sicuramente farne parte.

Contrariamente alle corna cave, il corno pieno è una formazione del tutto originale dal punto di vista anatomico. Esso è l'osso di gran lunga piú rapido nella crescita dopo la nascita. Il mio interesse per questo insolito tessuto risale al tempo in cui ero studente del second'anno di medicina, anno in cui cominciai uno studio sui cambiamenti stagionali dell'alce, nei laboratori della New York Zoological Society. Mostrai una delle mie sezioni istologiche di tessuto di corno in accrescimento al mio professore, James Ewing, che era allora una eminente personalità nello studio dei tumori maligni. Esaminandolo al microscopio, egli descrisse il tessuto, che era straordinariamente ricco di cellule in mitosi, come un esempio di sarcoma osseo maligno. Quando dissi a Ewing che si trattava in realtà di una fettina di corno in via di normale sviluppo, egli m'incoraggiò a proseguire lo studio del tessuto, proprio perché simulava una neoplasia maligna.

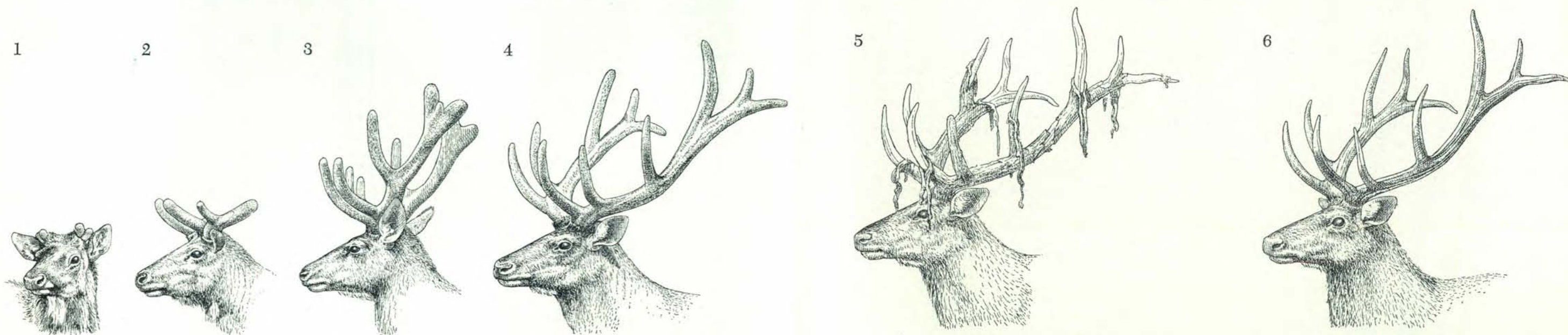
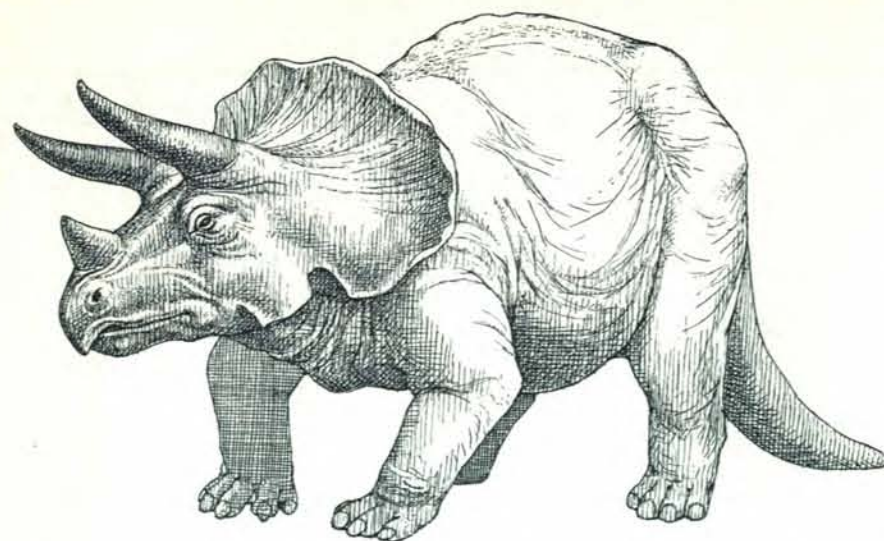
Purtroppo né io né altri ricercatori siamo riusciti finora a scoprire la natura del meccanismo che controlla la crescita esuberante delle cellule del corno pieno. Benché al microscopio non si possa distinguere il tessuto del corno in crescita attiva da quello del tumore maligno dell'osso, è chiaro che lo sviluppo del primo è sotto rigido controllo. Invece di diffondersi disordinatamente, le cellule producono una struttura molto ben definita che cresce sopra la testa. Nel giro di pochi mesi le cellule originarie producono una grande impalcatura ossea assai complessa. Poi, alla fine della stagione dell'accoppiamento, per mezzo di speciali meccanismi elaborati dall'organismo, questa struttura viene

L'apporto di sangue alle corna piene è assicurato dalle arteriole e venuzze disegnate a sinistra. La struttura del corno pieno è mostrata nella metà destra.

Confronto tra animali muniti di corna e una giraffa. Gli animali muniti di corna sono (*a*) il muflone, (*b*) la gazzella, (*c*) lo gnu, (*d*) il rinoceronte, il cui corno è costituito di filamenti tubolari come le altre corna cave ma, a differenza di queste, è compatto anziché cavo, (*e*) l'antilocapra, che è l'unico animale fornito di corna cave decidue, ossia che cadono periodicamente. La testa della giraffa (*f*) ha sporgenze che non sono vere corna, ma protuberanze coperte da un'epidermide pelosa.

amputata nettamente ed eliminata. Nessun chirurgo ha mai raggiunto un simile successo nell'asportare un sarcoma osseo. È da notare tuttavia che, come un tumore maligno, il corno pieno si riforma (ogni anno finché il maschio diventa vecchissimo) poiché alcune cellule embrionali vengono lasciate.

Le corna piene hanno messo in difficoltà i naturalisti già dai tempi antichi. Fino all'inizio del XIX secolo essi pensavano che fossero fatte di legno; i naturalisti francesi le chiamavano *bois* ed attribuivano il termine *écorce*, che significa corteccia, al velluto che si staccava alla fine dell'estate. La scoperta che esse erano veramente ossa non fu fatta finché un ricercatore del XIX secolo non bollí le corna e riconobbe la gelatina nel residuo.

Non tutti i naturalisti avevano opinioni cosí ingenue come i francesi. Poiché le corna piene sono una caratteristica maschile, alcuni antichi ricercatori cercarono di metterle in rapporto con la fisiologia dei maschi. Aristotele osservava giustamente: « Se i cervi maschi vengono castrati prima che siano cresciuti abbastanza per avere le corna, queste non appariranno mai, ma se essi vengono castrati dopo che le corna sono cresciute, queste non cambiano piú le proprie dimensioni e non saranno piú soggette alla muta annuale ». In anni piú recenti è stato dimostrato che iniezioni dell'ormone maschile testosterone possono far sviluppare le corna in un cervo maschio castrato. Iniettando ormone maschile in una cerva castrata, si può stimolare la produzione di protuberanze, coperte di cute simile al velluto, nelle zone del cranio dove le corna crescono normalmente nel maschio. Io stesso ho osservato (come del resto altri autori) vecchie cerve, dopo la menopausa, con simili protuberanze.

Come si forma il corno pieno? Molti anni fa alcuni ricercatori, mediante i coloranti ematossilina ed eosina normalmente usati per studiare al microscopio gli intimi particolari della crescita dei tessuti, conclusero che le corna piene, come le ossa lunghe del corpo, si sviluppavano passando attraverso uno stadio cartilagineo intermedio. Osservando invece il tessuto al microscopio con speciali tecniche di impregnazione con l'argento trovai che l'osso del corpo, come le ossa del cranio, si forma per ossificazione diretta dell'intelaiatura di tessuto fibroso che si sviluppa per primo. Esso diviene un osso spugnoso, con una cavità interna che è in comunicazione con le cavità delle ossa craniche e ne condivide la circolazione sanguigna. Stranamente, a differenza di altre ossa spugnose, come lo sterno e il bacino, l'osso del corno non contribuisce alla produzione di corpuscoli del sangue, benché in esso vi sia una ricca vascolarizzazione (e un po' di midollo giallo).

Sotto l'influenza di un ritmo ormonale stagionale, nel cervo maschio le corna cominciano a crescere in primavera (fine d'aprile o maggio negli Stati Uniti). Il corno in via di sviluppo sporge dal velluto che copre il nodulo osseo posto sopra l'osso frontale, poco tempo dopo che il vecchio corno si è separato da esso. In breve tempo alcuni fibroblasti (cellule embrionali), rimasti dopo la caduta delle corna, proliferano sotto il derma, mentre il velluto

L'evoluzione annuale delle corna piene, che appartengono in questo caso al wapiti, comincia (*1*) con l'apparizione di bottoni vellutati in aprile, circa sei settimane dopo che le corna precedenti sono cadute. Nel giro di due settimane (*2*) esse hanno assunto il tipico aspetto ramificato. Alla fine di maggio (*3*) le corna sono sviluppate e completamente coperte dal velluto. Durante questo periodo l'animale cerca di evitare gli ostacoli. In agosto (*4*) le corna hanno completato la crescita e il velluto ha cominciato a essiccarsi sulle punte. Quando il tessuto osseo del corno si è ben consolidato, il velluto muore (*5*) e si stacca a brandelli. Dopo che le corna hanno perduto il velluto (*6*), il wapiti, che è un cervo americano, diventa sessualmente aggressivo.

Un antico animale munito di corna cave era il *Triceratops*, un rettile con tre corna e un rivestimento corneo simile a uno scudo. Le corna nacquero coi primi grandi rettili.

Un animale munito di corna piene, molto piú recente del *Triceratops*, ma estinto, era l'alce irlandese gigante. Le sue corna massicce pesavano piú dell'intero scheletro.

cresce per adattarsi al corno che si sviluppa. I fibroblasti formano rapidamente l'impalcatura del corno, come rami e ramoscelli crescono su un albero. Intanto gli osteoblasti (cellule formatrici dell'osso) cominciano a penetrare nello stroma costruito dai fibroblasti e a depositare i sali di calcio necessari per la formazione dell'osso. L'osso che ne risulta ha uno spessore sottile e non è robusto come le ossa del cranio, ma, a parte il fatto che non forma sangue, non si può distinguere dalle ossa spugnose dello scheletro.

In settembre il corno è cresciuto completamente e si è solidamente saldato al nodulo osseo del frontale. L'osso alla base diventa progressivamente piú compatto e alla fine interrompe il flusso di sangue dal cranio all'interno del corno. Tuttavia le arterie che percorrono il velluto che ricopre il corno forniscono ancora un po' di sangue. Ben presto, a causa di un meccanismo che non è ancora stato spiegato in modo soddisfacente, il velluto comincia a degenerare; si essicca e viene eliminato dal cervo, distaccandosi a lembi quando l'animale strofina le corna contro alberi o cespugli.

A questo stadio le corna non hanno circolazione sanguigna o nervi e sono insensibili a stimoli dolorifici. L'osso e le acute ramificazioni del corno restano allo scoperto, e per alcune settimane in autunno le corna a molte punte potrebbero essere usate come arma. Tuttavia si tratta di un'arma poco maneggevole, il cui sviluppo inoltre non è molto tempestivo, poiché in questa stagione i cerbiatti nati dai precedenti accoppiamenti sono abbastanza agili per sfuggire ai predatori e non hanno piú bisogno della protezione del genitore. Come ho già detto, quando i cervi maschi lottano tra loro per procurarsi un harem per la nuova stagione dell'accoppiamento, le corna possono essere pericolose per entrambi gli avversari. Inoltre, come si può spiegare il fatto curioso che talvolta i vincitori dell'harem sono maschi che per qualche ragione sconosciuta non hanno sviluppato le corna? Potrebbero essere migliori combattenti perché non hanno corna?

Il fatto che le corna piene siano poco adatte come armi suggerisce l'ipotesi che esse non si sono in realtà evolute per questa funzione. Secondo una interessante teoria le corna potrebbero servire ai Cervidi come mezzo per rinfrescarsi durante l'estate. Il velluto che copre il corno procura un ammirevole mezzo per irradiare il calore corporeo, mediante la considerevole superficie e

La tendenza evolutiva negli animali muniti di corna piene può essere rappresentata dal daino acquatico cinese (*a sinistra*) e dal mosco (*a destra*), che sono i soli Cervidi che non possiedono le corna, ma hanno invece sviluppato le zanne.

l'estensione dei vasi sanguigni periferici e delle ghiandole sebacee. Il fatto che il velluto si stacchi alla fine dell'estate e che le corna cadano non molto tempo dopo, dà un certo appoggio a questa congettura. È difficile immaginare altre ragioni plausibili per spiegare il motivo per cui la natura abbia dotato questi animali di una sovrastruttura elaborata, usata solo per alcune settimane all'anno e scartata ogni anno dopo aver prodotto una notevole spesa metabolica. (Alla domanda: perché le femmine non possiedono queste superfici radianti, i sostenitori di questa ipotesi rispondono che le femmine restano all'ombra.)

Nel tardo autunno parte del cemento che unisce la base del corno al nodulo osseo si riassorbe, la saldatura si indebolisce e le corna cadono non per un processo attivo, ma spezzandosi contro gli eventuali ostacoli. La rottura avviene nettamente all'attaccatura con il cranio, dove le corna in primavera iniziarono a spuntare; si ha una breve emorragia, senza dolore. Una nuova crescita di velluto peloso (non il tessuto cicatriziale glabro, sprovvisto di ghiandole sudoripare, che si forma quando guarisce una ferita) ricopre rapidamente la ferita, e gli organi e le cellule adibiti alla formazione delle corna entrano in uno stato di quiescenza che dura da dicembre fino ad aprile o maggio. Tuttavia una iniezione di testosterone durante questo periodo può accelerare la crescita delle corna.

Nonostante la singolarità e l'apparente inutilità delle corna piene, queste non possono essere certamente chiamate un'anomalia della natura. Come protuberanze esse sono una versione un po' strana di un fenomeno che si ricollega alla storia dei primi animali terrestri. Le corna cave risalgono ad almeno 100 milioni di anni fa. Nel periodo cretacico esistevano Dinosauri e Rettili simili a coccodrilli con le corna. L'aspetto di questi animali farebbe sfigurare l'immaginazione degli scrittori di fantascienza. Il *Triceratops* aveva tre corna: uno grosso che spuntava dal naso e uno sopra ogni occhio. Lo *Styracosaurus* aveva una prominenza nasale diritta di circa sessanta centimetri, e una corazza con sei punte intorno al collo. Sono state trovate protuberanze craniche anche tra i fossili di alcuni Mammiferi primitivi, in particolare degli elefanti. Le corna cave erano armi formidabili in alcuni di essi, come nello *Arsinoitherium*, ma in altri, come l'*Uintatherium* e il *Brontotherium*, erano prolungamenti smussati del cranio, probabilmente ricoperti da cute. Alla fine dell'Eocene, circa 40 milioni di anni fa, appare il rinoceronte, col suo corno nudo, strumento di offesa simile alle corna degli antichi Rettili.

Il rinoceronte è strano sotto diversi aspetti. È l'unico perissodattilo fornito di corna. I Rinocerontidi comprendono non solo il mitologico unicorno, ma anche parecchie specie di rinoceronti con due corna, entrambe poste sulla linea mediana, uno dietro l'altro. Il corno del rinoceronte è eccezionale anche perché non è cavo, ma riempito completamente di cheratina. In tempi preistorici l'animale deve aver fatto un uso considerevole del suo corno come arma, ma al giorno d'oggi la taglia massiccia e la corazza sono una protezione sufficiente per scoraggiare gli attacchi dei suoi meno robusti rivali.

Paradossalmente, nella nostra era il corno è stato la rovina del rinoceronte. Per piú di 1000 anni l'uomo, diventato il suo principale nemico, è andato a caccia del rinoceronte per impadronirsi del corno. In Cina il corno di rinoceronte macinato è stato a lungo apprezzato per i suoi presunti pregi come afrodisiaco e rimedio contro vari disturbi, e oggi nei mercati sanitari della Cina e dell'Africa si dice che il corno ha un valore equivalente a metà del suo peso in oro. Si fanno pure buoni affari con il sangue secco di rinoceronte e con il cuoio, che si usa per le

corazze dei guerrieri. Alcuni rinoceronti riescono a sopravvivere in Asia ai cacciatori, e in alcune regioni dell'Africa l'animale è protetto dalla legge.

Durante il Miocene, iniziato circa 25 milioni di anni fa, corna cave e corna piene si svilupparono in molte specie di due importanti famiglie di ungulati, i Bovidi e i Cervidi. Queste due famiglie sono cosí simili sotto molti aspetti che debbono aver avuto un antenato comune. Tuttavia le grandi differenze tra corno cavo e corno pieno indicano che le due forme di appendici del capo hanno differenti origini. La crescita del corno di cheratina la si ritrova nei Bovidi, trasportata tale e quale dall'età dei Rettili, 100 milioni di anni fa. Nei Cervidi il corno pieno si presentò come un prodotto fondamentalmente nuovo. Secondo i reperti fossili disponibili, il primo cervide fornito di corna fu il *Dicrocerus*, un ungulato dell'inizio del Miocene, che possedeva semplicissime corna piene, sotto forma di corte punte. Poiché il corno pieno è costruito con cosí poco materiale che si deteriora circa due volte piú velocemente delle ossa del cranio, può darsi che la sua storia passata non sia cosí ben testimoniata dai reperti paleontologici come quella del cranio e delle ossa dello scheletro. La documentazione mostra, comunque, che nel Pleistocene le corna piene si diffusero tra i Cervidi e alcune si accrebbero mostruosamente. Probabilmente le corna piú imponenti di tutti i tempi apparvero con il grande cervo (*Cervus megaceros*) dell'era glaciale; le sue due corna avevano una apertura di tre metri e pesavano circa settanta chilogrammi. Tra le specie viventi dei Cervidi, attualmente tutte, meno due, hanno le corna. Le eccezioni sono il daino acquatico cinese e il mosco (*si veda la figura nella pagina precedente*).

Vi sono ragioni di credere che la giraffa e l'okapia siano parenti stretti dei Cervidi con cui ebbero in comune i progenitori. Le protuberanze permanenti sulla testa della giraffa e dell'okapia, infatti, sembrano piú simili alle corna piene che a quelle cave, essendo formate da un'asta ossea rivestita da un'epidermide pelosa.

Stranamente le corna cave e quelle piene sono invariabilmente associate a determinate altre strutture anatomiche con le quali in apparenza non hanno relazione. Praticamente tutti gli Artiodattili Ruminanti possiedono sporgenze craniche di un genere o dell'altro (corna cave, corna piene o protuberanze): tra questi vi sono i Bovidi e Cervidi, l'antilocapra, la giraffa e l'okapia. I Perissodattili (cioè il cavallo, l'asino e la zebra) non hanno mai formazioni tipo corna, con la sola eccezione del rinoceronte e neppure gli Artiodattili con stomaco pseudoruminante, o a tre scompartimenti (cammelli, lama e altri), come pure quelli con stomaco a un solo scompartimento (maiali, pecari e ippopotami). Che relazione può esserci tra corna cave o piene e stomaco di un ruminante vero e proprio o zoccoli degli Artiodattili? Per quale strano evento nell'evoluzione queste caratteristiche apparentemente senza relazioni si sono trovate associate, sempre che tale concomitanza non sia puramente casuale?

Comunque, questo problema è molto meno arduo della questione riguardante l'evoluzione delle corna piene e la loro paradossale conservazione fino ai nostri giorni. Il successo evolutivo delle corna cave, che hanno provato la loro efficacia con tentativi di oltre 100 milioni di anni e che ora sono caratteristiche di un gran numero di ungulati, è certamente comprensibile. Il corno pieno invece è un ingombro con un'utilità molto limitata, se non addirittura discutibile; sorprende perciò che esso sia durato per piú di 25 milioni di anni e che sia ancora caratteristico di quasi tutta la famiglia dei Cervidi. Ma è stato constatato sia nei reperti fossili sia nella storia della caccia che le corna piene, insieme agli animali che le portano, stanno scomparendo. Le frequenti lotte suicide con le corna, che finiscono per uccidere alcuni dei cervi maschi migliori e piú forti, possono aver avuto un ruolo importante in questo declino. La conservazione dei Cervidi è ora lo scopo del programma statunitense per la protezione della fauna e flora selvatiche ma ciò ha dato luogo a un incremento eccessivo della popolazione che ha trasformato i cervi in un vero flagello; ora è necessaria una caccia stagionale degli animali su grande scala, per risparmiare loro dallo sterminio e le nostre foreste dallo scortecciamento. La superprotezione degli animali con il conseguente squilibrio ecologico non è di alcuna utilità.

È possibile che nel corso dei tempi la selezione naturale possa salvare i Cervidi eliminando quelli dalle corna troppo ingombranti cosicché i sopravvissuti della famiglia possano diventare come le due specie prive di corna e cioè il daino acquatico cinese e il mosco. In ogni caso è evidente che le corna piene, se non gli stessi animali muniti di esse, sono condannati dall'evoluzione e che le otto renne di Babbo Natale dalle immense corna, come già il meraviglioso unicorno, rimarranno un giorno soltanto una leggenda.

LA DANZA DEI SOLIDI

di John Updike

Oggi solo uno scrittore americano può ancora dilettarsi a mettere in versi degli argomenti scientifici come facevano, nel fervore dell'Illuminismo, gli eruditi italiani. Memori di questa tradizione abbiamo reso i versi di Updike nel metro caratteristico di quelle composizioni, facendo anche largo uso delle loro caratteristiche tipografiche.

« Atomi son le cose tutte: tutto,
l'Acqua e la Terra come il Fuoco e l'Aria »,
il milesio *Democrito* predisse.
Paracelso alchimista tre Principi,
credette poi trovar nella Materia:
Sale e Solfuro li chiamò e Mercurio,
nel suo covo di stregon seguendo
millenarie speranze di trovare
in alambicchi e storte un falso oro.
Tolse credenza *Lavoisier* al Flogisto.
L'Analisi tentò Molecolare
quindi nei gas ardite spedizioni
e nudo allor fra noi sorse l'Idrogeno,
sotto lo sguardo ancora stupefatto
degli scienziati increduli e dei dotti.

Serbare volle ancor lo Stato Solido
vigliaccamente ascosa e pur velata
la sua real Microstruttura in grani
finché forò i piani cristallini
la *diffrazione de' raggi X*, scoprendo
la capricciosa danza e la Quadriglia
ordinata e precisa nella quale
le quattro dita delle lor Valenze
gli atomi del Silicio e del Carbonio
intrecciano, le mani nelle mani,
con gli Ioni e con le Terre Rare,
i telai a riempir della Materia
di Eccitazion piccine eppur grandiose.

Di miniere Signor, Monarchi illustri
sono i Metalli, e buoni conduttori
e opachi e duttili son. L'Atomo loro
gli Elettroni suoi liberalmente dona
alla causa comune, mutuo gioco.
Prendon gli Ioni l'ammucchiata forma
di Sfere allor, e slittano e si spostano
se vengono pressati oppur percossi:
per questo i Metalli son piú utili
a fabbricar fermagli per le carte
che leggere e frangibili Vetrine.
E li feriscon le Cesoie e al Fuoco
brillano luminosi e s'arroventano.

Dell'Arti umane Regina fangosa
dapprima serví l'Argilla come un Sasso:
grezza creta di poi forní il Feldspato,
e i Rubini, la Porcellana e il Quarzo
in luce ad uno ad un vennero alfine.
Tipico è dell'Alluminio l'Ossido;
ionicamente al Metallo s'unisce
l'Ossigeno, poi l'Ossido n'è il frutto.
Privi di libertà marea lubrica
formano gli Elettron. Saran pertanto
quali Imperatrici le Ceramiche
friabili, porose, resistenti
e refrattarie al gelo ed al calore.

Principe Vetro, figlio dell'Argilla,
terso e puro tu sei come il cristallo
ma lontano dalla forma cristallina:
come morboso voyeur, come Narciso,
appassionato guardi nel Disordine,
formato da Legami Covalenti
che Viscosità producono lunghissima
e le loro lenti reti apprestano
per cui rapidi corrono i *fotoni.*
Il Polimero tipo gode al caldo
d'uno stato viscoso come il Vetro,
ma quando il freddo rapido l'assale
sulla sua libertà cade l'oblio
e in chiusi Minuetti si rattrista.

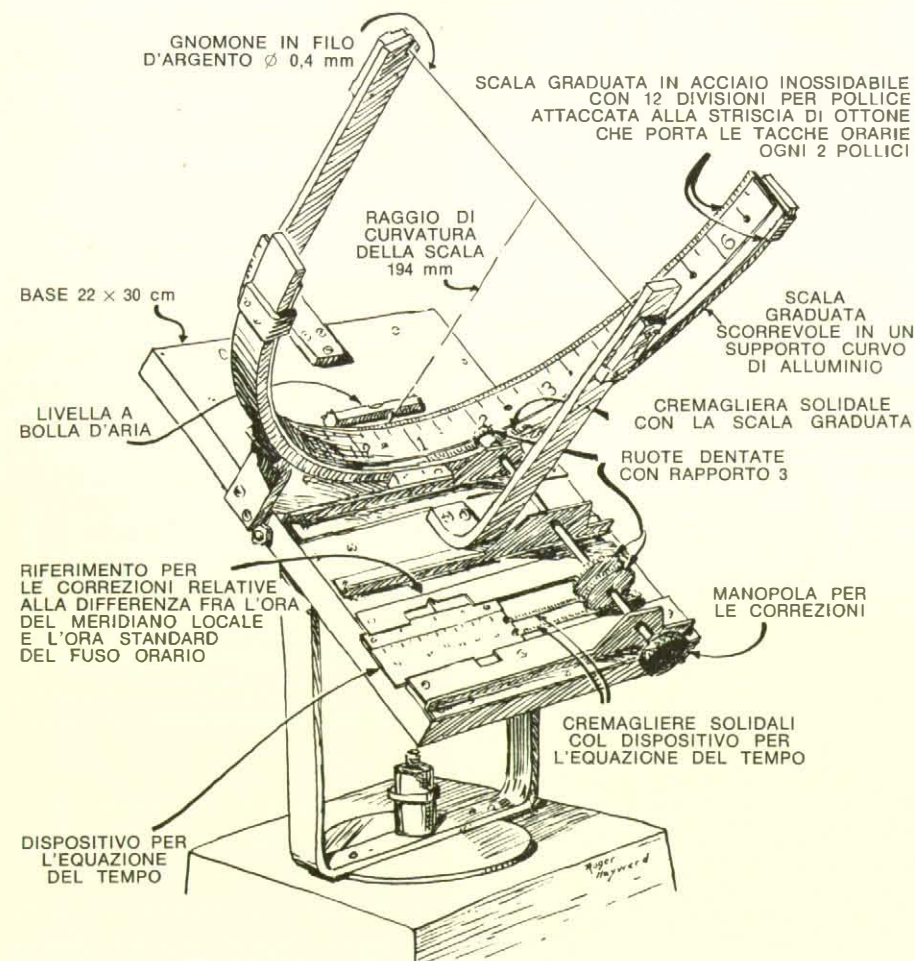
Gigantesche Molecole, i Polimeri
– l'Amido o il Poliossimetilene –,
simili a proteinici vassalli
e a giullari rivestono Vitale
il Regno tutto. Il secol nostro ha visto
del Poliisopren trovar la sintesi
e molte Spire legate come in croce
che ignote a *Robert Hooke* erano state,
mentre ad ogni fagiolo in mezzo ai campi
ben nota era già la Cellulosa
e la Natura senza ausilio alcuno
da sempre l'Ossa viene componendo
con Apatite rara e con Collagene.

Che accade dunque dentro quei Telai
quando il Calor le proprie Vibrazioni
farà correr per una massa solida?
La formula $T = 3\,Nk$
è concisa, è chiara ed è perfetta:
non assomiglia un rigido Cristallo
ai gas che fluidi sono per natura.
Propose il *Debye* a tutti gli Scienziati
d'immaginare delle Onde Elastiche
che *fononi* chiamò e che servissero
la grande Legge dei Quanti di *Max Planck.*
Anche se il Vetro Amorfo sfugge all'*Umklapp*
e gli Isotopi monelli si fan gioco
della sua Formula, Debye conserva
la reverenza e gratitudin nostra.

L'Elettroconduttività dipende
dagli Elettroni in libertà: un pizzico
aggiungi sol d'Arsenico al Germanio
e gli Elettroni vagheranno sciolti.
Nei composti, come l'Ossido di Nickel,
fanno barriera alla corrente gli *Ohm*:
in gran misura la Resistenza varia,
dai fili di Rame fino al Chewing Gum.
La Luce e il Freddo, il misterioso *doping*,
l'esser situati in vicinanza,
il modo in cui gli Ioni si diffondono,
ed altri molti reconditi fattori
modifican la somma complessiva
dei Livelli che nome hanno da *Fermi.*

I Manuali sol, con gli alti Cieli,
godono della somma perfezione:
stato imperfetto è quel dei Solidi;
nella franta e caotica Realtà
regnano dei *cristalli* irregolari,
senza sistema. Ed Atomi vaganti
precipitano e cadon negli spazi.
Anche dei buchi vagan senza legge
in tra le particelle: gli *eccitoni.*
Per via della lentezza di legami
alcuni Sostrati chimici corrodono
e fanno azion di catalizzatori:
Macchie si crean sulle superfici
perché fissare i propri Connettori
durevoli e profondi come artigli
possa l'Accrescimento Epitassiale.

Del Sol la bianca luce vide Newton
non esser pura come appare agli occhi:
uno Spettro mise a nudo alla sua vista
l'Arcobaleno. Ciascun Elemento
ovunque lascia impresso il suo sigillo;
aggiungi un Elettrone negativo
per esempio al Cloruro di Potassio:
diventerà blu cupo, come il Cromo
renderà carnacino lo Zaffiro.
Se assorbite, le lunghezze d'onda
vengon riemesse poi in varia forma:
per Fluorescenza, per Fosforescenza,
o per le piú elevate Intensità
richieste dai mortali *Raggi Laser.*

Nei nuclei degli Atomi Magnetici,
come nel cuor minuscolo del Ferro,
si rintanano dispari Elettroni,
ciascun dei quali è come calamita
che ruota, essendo pronta a scavalcare
le Pareti di *Bloch*, ove convergano
Domini che sian antiparalleli.
La Materia diffusa indi Magnetica
può divenire quando un altro Campo
allinei domini e li raccolga
come in onda marina Alga s'avvolve.
Cosí, in uno spettacolo stupendo,
concedon queste forze microscopiche,
racchiuse in Unità che ai nostri occhi
giorno per giorno divengon piú visibili,
il potere agli Uomini sul Mondo.

La meridiana progettata da William C. Boyd.

golabile: l'ora, indicata dall'ombra dello gnomone, può essere corretta ruotando la scala graduata, proprio come si fa normalmente con un orologio spostando a mano le lancette.

« La meridiana deve essere regolata ogni giorno se si vuole che l'ora da essa indicata corrisponda a quella di un orologio, poiché l'ombra dello gnomone "cammina" piú o meno velocemente di un orologio, di una quantità nota, variabile nel corso dell'anno. Questa variazione, nota come equazione del tempo, può essere tabulata sotto forma numerica come fattore di correzione relativo alla posizione della scala per ogni giorno dell'anno. Questi dati si possono trovare facilmente in qualunque manuale di letteratura specifica. Io ho inciso questa tabella su una lamina metallica, fissata alla meridiana, ma si può anche fare una fotocopia della tabella e ripararla dalle intemperie con una busta trasparente.

« Lo strumento può essere agevolmente costruito da chiunque abbia a disposizione un piccolo laboratorio casalingo. Quello che ho costruito io è fatto per la maggior parte di alluminio, comperato dal ferramenta e da me stesso lavorato. Il dispositivo è tenuto insieme con viti d'ottone con dado o con filettatura nell'alluminio stesso. L'operazione piú difficoltosa è la graduazione della scala; io ho superato la difficoltà usando una riga di acciaio inossidabile con graduazioni di $^1/_{12}$ di pollice per divisione, lunga 60 cm. Ho poi incurvato questa riga a formare una semicirconferenza di raggio 194 mm (*si veda la figura in alto*). Questa semicirconferenza corrisponde all'intervallo di dodici ore; ogni divisione rappresenta due minuti e mezzo. Le altre dimensioni dello strumento dipendono dalle dimensioni della scala graduata. La scala graduata deve scorrere in un supporto di alluminio semicircolare, e è mantenuta a esso aderente per mezzo di viti di ottone scorrevoli entro apposite feritoie; lateralmente è guidata per mezzo di arresti fissati agli estremi dell'arco di cerchio di alluminio. La scala graduata può cosí ruotare avanti o indietro lungo il supporto per mezzo di una cremagliera di ottone avente la stessa sua curvatura e a essa saldata. Nella cremagliera ingrana un pignone dentato fissato all'estremità di un albero; l'altra estremità di questo albero è munita di una manopola che sporge dal perimetro della meridiana. Per correggere l'ora indicata dalla meridiana basta ruotare questa manopola in un verso o nell'altro.

« Un altro utile accorgimento per aumentare la precisione della meridiana è un dispositivo per l'equazione del tempo, che predispone automaticamente la posizione della scala graduata. Questo dispositivo è formato da una scala graduata piana collegata con la scala graduata curva per mezzo di una coppia di cremagliere piane in presa con una coppia di ruote dentate solidali con l'albero di regolazione. La scala graduata piana scorre entro apposite guide. Le ruote dentate hanno un numero di denti tre volte maggiore di quello dell'ingranaggio in presa sulla cremagliera curva, per cui lo spostamento lineare della scala piana è tre volte maggiore dello spostamento della scala curva. Con tale rapporto di ingranaggi, un intervallo di tempo di due minuti e mezzo corrisponde a uno spostamento della scala piana di 6,35 mm. Tale scala è ricavata da una riga graduata di acciaio. Ho tracciato poi a mano una scala per il nonio, che ho fissato alla base dello strumento, in corrispondenza della scala graduata piana.

« Lo gnomone consiste di un filo di argento del diametro di 0,4 mm, lungo circa 25 cm, teso a 194 mm di altezza sopra la scala curva per mezzo di piastrine regolabili fissate a due supporti di alluminio. La base dello strumento è costruita in modo da poter ruotare in un piano orizzontale e in un piano verticale. In tal modo si può puntare lo gnomone in direzione del nord reale, parallelamente all'asse terrestre. Quando lo gnomone è cosí orientato, è possibile, anche senza l'aiuto del nonio, disporre la meridiana in modo che l'ora indicata non differisca per piú di 15 secondi da quella del tempo reale locale segnata da un orologio.

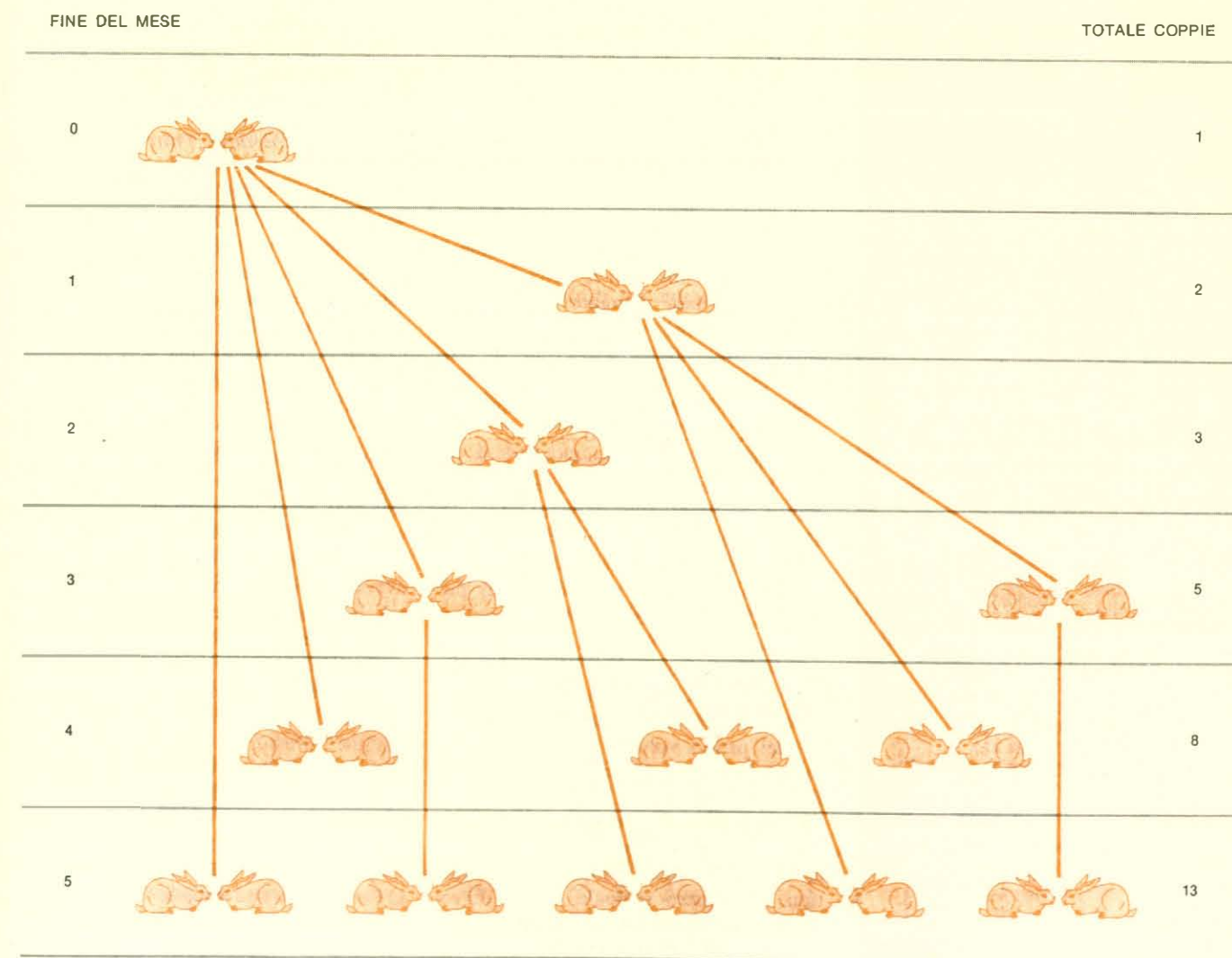
« Per controllare il funzionamento della meridiana un giorno ho effettuato un totale di 18 letture, spaziate circa 40 minuti l'una dall'altra, e ho confrontato ogni lettura con un buon orologio sincronizzato in precedenza con i segnali orari emessi dalla radio. L'errore massimo riscontrato ammontava a + 0,5 minuti, l'errore medio a ± 0,17 minuti, ossia a circa 10 secondi. Molti orologi non sono cosí precisi. Inoltre, gli errori della meridiana non si sommano. D'altra parte, però, è necessario che ci sia il Sole. »

GIOCHI MATEMATICI

di Martin Gardner

Il multiforme fascino della successione di Fibonacci

Il piú grande matematico europeo del medioevo fu Leonardo da Pisa, meglio noto come Fibonacci, ossia « figlio di Bonaccio ». Nacque a Pisa ma fu a Bona, in Algeria, dove suo padre era funzionario di un ufficio commerciale, che il giovane Leonardo apprese le prime nozioni matematiche da precettori musulmani. Egli riconobbe subito l'enorme superiorità del sistema decimale indo-arabico, basato sulla notazione posizionale e sull'uso dello zero, nei confronti del poco pratico sistema romano ancora in uso in Italia. La sua opera piú nota è il *Liber Abaci*, un esauriente manuale di aritmetica e algebra a uso dei mercanti. Nel libro sono sostenuti i pregi della notazione indo-arabica e, per quanto destasse scarso interesse nei mercanti italiani del tempo, esso ebbe una influenza decisiva nell'introduzione in Occidente del sistema indo-arabico. Il *Liber Abaci* fu ultimato a Pisa nel 1202, ma ci è giunto solo in un'edizione riveduta del 1228, dedicata a un famoso astrologo dell'epoca.

Per ironia della sorte, Fibonacci, che pure diede validi contributi alla matematica, è ricordato oggi soprattutto perché, nel diciannovesimo secolo, Eduard Lucas (uno studioso francese di teoria dei numeri e autore di un'opera ormai classica in quattro volumi sui passatempi matematici) chiamò con il suo nome una successione che si presenta in un facile problema del *Liber*

Grafo ad albero per i conigli di Fibonacci.

Abaci. Supponiamo, aveva scritto Leonardo, che una coppia di conigli adulti sia allevata in una conigliera. Ammettiamo che i conigli comincino a prolificare all'età di due mesi, generando una coppia maschio-femmina alla fine di ogni mese. Se nessuno dei conigli muore, quanti conigli si troveranno nella conigliera in capo a un anno? Il grafo ad albero (*si veda la figura nella pagina precedente*) mostra ciò che avviene nei primi cinque mesi. È facile vedere che il numero di coppie alla fine di ogni mese è successivamente: 1, 2, 3, 5, 8, ... Come osservò lo stesso Fibonacci, ogni numero che compare in

n	F_n
1	1
2	1
3	2
4	3
5	5
6	8
7	13
8	21
9	34
10	55
11	89
12	144
13	233
14	377
15	610
16	987
17	1 597
18	2 584
19	4 181
20	6 765
21	10 946
22	17 711
23	28 657
24	46368
25	75 025
26	121 393
27	196 418
28	317 811
29	514229
30	832 040
31	1 346 269
32	2 178 309
33	3 524 578
34	5 702 887
35	9 227 465
36	14 930 352
37	24 157 817
38	39 088 169
39	63 245 986
40	102 334 155
41	165 580 141
42	267 914 296
43	433 494 437
44	701 408 733
45	1 134 903 170
46	1 836 311 903
47	2 971 215 073
48	4 807 526 976
49	7 778 742 049
50	12 586 269 025

I primi 50 numeri di Fibonacci.

questa successione (a eccezione, ovviamente, dei primi due) è la somma dei due numeri che lo precedono. Alla fine dei dodici mesi le coppie di conigli saranno 377.

Fibonacci non indagò le proprietà di questa successione e si dovette attendere l'inizio del diciannovesimo secolo perché, come ebbe a dire un matematico, gli scritti sull'argomento cominciassero a moltiplicarsi quasi alla stessa velocità dei conigli di Fibonacci. Lucas eseguí un profondo studio su quelle successioni (oggi dette « successioni generalizzate di Fibonacci ») che iniziano con una *qualsiasi* coppia di numeri interi, essendo ogni numero successivo la somma dei due che lo precedono. Egli chiamò la piú semplice di tali successioni: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, ... , successione di Fibonacci. La posizione di ogni numero di questa successione è tradizionalmente indicata da un indice, cosicché $F_1 = 1$, $F_2 = 2$, e cosí via. (I primi 50 numeri di Fibonacci sono elencati nella figura di questa pagina.) F_n rappresenta il generico numero di Fibonacci, F_{n+1} il numero che lo segue, e F_{n-1} quello che lo precede. F_{2n} è il numero di Fibonacci il cui indice è il doppio di quello di F_n e cosí via.

La successione di Fibonacci ha dato filo da torcere ai matematici per secoli; ciò si deve al suo inaspettato presentarsi nei contesti piú vari, ma soprattutto al fatto che anche il meno smaliziato dilettante di teoria dei numeri, senza conoscenze al di là dell'aritmetica elementare, può indagare le proprietà della successione e scoprire quella che sembra una varietà senza fine di teoremi curiosi. Recentemente, certi sviluppi della teoria della programmazione dei calcolatori hanno ridestato interesse attorno alla successione: si è infatti trovato che essa può essere utilmente applicata alla classificazione dei dati, alla ricerca delle informazioni, alla generazione di numeri casuali e persino alla ricerca di metodi rapidi per approssimare gli estremi (valori massimi o minimi) di funzioni le cui derivate non siano note.

I piú antichi risultati attorno alla successione sono riassunti nel capitolo 17 del primo volume della *History of the Theory of Numbers* di Leonard Eugene Dickson. Il lettore interessato alle scoperte piú recenti può consultare « The Fibonacci Quarterly » pubblicato dal 1963 dalla Fibonacci Association. (Il prezzo annuale è ora di sei dollari, le domande di abbonamento vanno rivolte all'amministratore, fratello Alfred Brousseau, al St. Mary's College, in California.) Edita da Verner E. Hoggart jr. del San Jose State College in California, la rivista si occupa principalmente dei numeri di Fibonacci generalizzati (quali per esempio i « numeri di Tribonacci » che sono la somma dei *tre* numeri antecedenti), ma anche dello « studio di numeri interi dotati di proprietà particolari ».

Certamente la proprietà piú importante della successione di Fibonacci (e che vale anche per le successioni generalizzate) è costituita dal fatto che il rapporto tra due numeri consecutivi di essa è alternativamente maggiore o minore del rapporto aureo e che, al procedere della successione, la differenza va diminuendo sempre piú, sicché la successione di questi rapporti ammette come proprio limite il rapporto aureo. Questo è il famoso numero irrazionale 1,61803..., che si ottiene dividendo per due la somma di 1 con la radice quadrata di 5. Si è scritto molto, e non sempre assennatamente, sul presentarsi del rapporto aureo e della successione di Fibonacci a esso strettamente collegata nello sviluppo di alcuni esseri viventi, oltre che sulla possibilità di applicare rapporto aureo e successione all'arte, all'architettura e persino alla poesia. Un professore di lettere classiche dell'Università di Princeton, George Eckel Duckworth, nel suo libro *Structural Pattern and Proportions in Vergil's Aeneid* (University of Michigan Press, 1962) sostiene che Virgilio e altri poeti latini del tempo facevano uso consapevole della successione di Fibonacci. Personalmente, mi sono occupato di queste questioni qualche tempo fa in un articolo sul rapporto aureo, riprodotto nel secondo volume di *Enigmi e giochi matematici* (Sansoni, 1968).

La piú sorprendente apparizione della successione di Fibonacci nel regno vegetale si ha nella distribuzione a spirale dei semi sulla superficie di certe varietà di girasoli. Ci sono due insiemi di spirali logaritmiche, quelle dell'uno avvolte in senso orario e quelle dell'altro in senso antiorario, come si vede dalla figura a fronte. I numeri delle spirali dei due tipi non sono uguali fra loro e tendono a essere due numeri di Fibonacci consecutivi. Per esempio, mentre girasoli di dimensioni medie hanno di solito 34 e 55 spirali, certi esemplari giganti giungono a 89 e 144. In una lettera a « The Scientific Monthly » (novembre 1951) un geologo del City College di New York, Daniel T. O'Connell, e sua moglie informano di aver rinvenuto un esemplare di girasole gigante con 144 e 233 spirali!

Lo stretto legame tra il rapporto aureo e la successione di Fibonacci è evidente dalla formula seguente che dà l'ennesimo numero di Fibonacci:

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}}\left[\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n\right]$$

Questa uguaglianza fornisce l'ennesimo numero di Fibonacci in modo esatto, ma è poco pratica per numeri di Fibonacci (che diremo per brevità numeri *F*) grandi, anche se l'uso dei logaritmi consente buone approssimazioni. Una formula molto piú semplice per l'ennesimo numero *F* è costituita dalla ennesima potenza del rapporto aureo divisa per la radice quadrata di cinque; con questa formula il numero cercato si ottiene approssimando il risultato all'intero piú prossimo. Entrambe le formule ricordate sono non ricorsive, poiché esse permettono il calcolo dell'ennesimo numero *F* direttamente da *n*, mentre un procedimento ricorsivo è costituito da una serie di stadi ciascuno dei quali dipende dai precedenti. Un esempio di calcolo per ricorrenza è costituito dal calcolo dell'ennesimo numero *F* eseguito sommando successivamente i numeri precedenti fino a raggiungere quello voluto. La definizione dell'ennesimo numero di Fibonacci come somma dei due precedenti è un semplice esempio di formula ricorsiva. (Due eccellenti algoritmi per calcolare esattamente grandi numeri di Fibonacci si trovano in risposta all'esercizio 26, pag. 552 di *Seminumerical Algorithms*, secondo volume di *The Art of Computer Programming* di Donald E. Knuth.)

Girasole con 55 spirali antiorarie e 89 orarie.

Il modo piú semplice di trovare la somma dei primi *n* numeri di Fibonacci consiste nel determinare F_{n+2} e sottrarvi 1. Per esempio, la somma dei primi 20 numeri *F* è 17 710, che si trova sottraendo 1 dal ventiduesimo numero di Fibonacci che è 17 711.

Alcune delle piú note proprietà dei numeri di Fibonacci, di non difficile dimostrazione, sono le seguenti:

1) Il quadrato di un numero *F* differisce di 1 dal prodotto del numero che lo precede con quello che lo segue. Il segno della differenza è alternativamente positivo o negativo al procedere della successione. Questa proprietà (e molte altre della successione di Fibonacci) è un caso speciale di una proprietà valida in generale per tutte le successioni che iniziano con una qualunque coppia di numeri. Anche nel caso generale, cioè, la differenza in parola è una costante alternativamente positiva o negativa. Per esempio, nel caso della successione 1, 3, 4, 7, 11, 18, ... (la piú semplice dopo quella di Fibonacci) studiata dal matematico francese Lucas, il valore costante della differenza è 5.

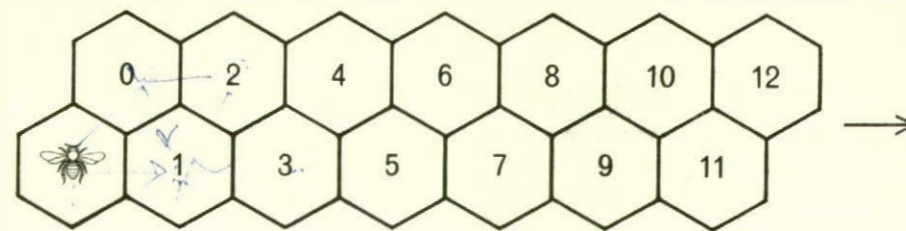
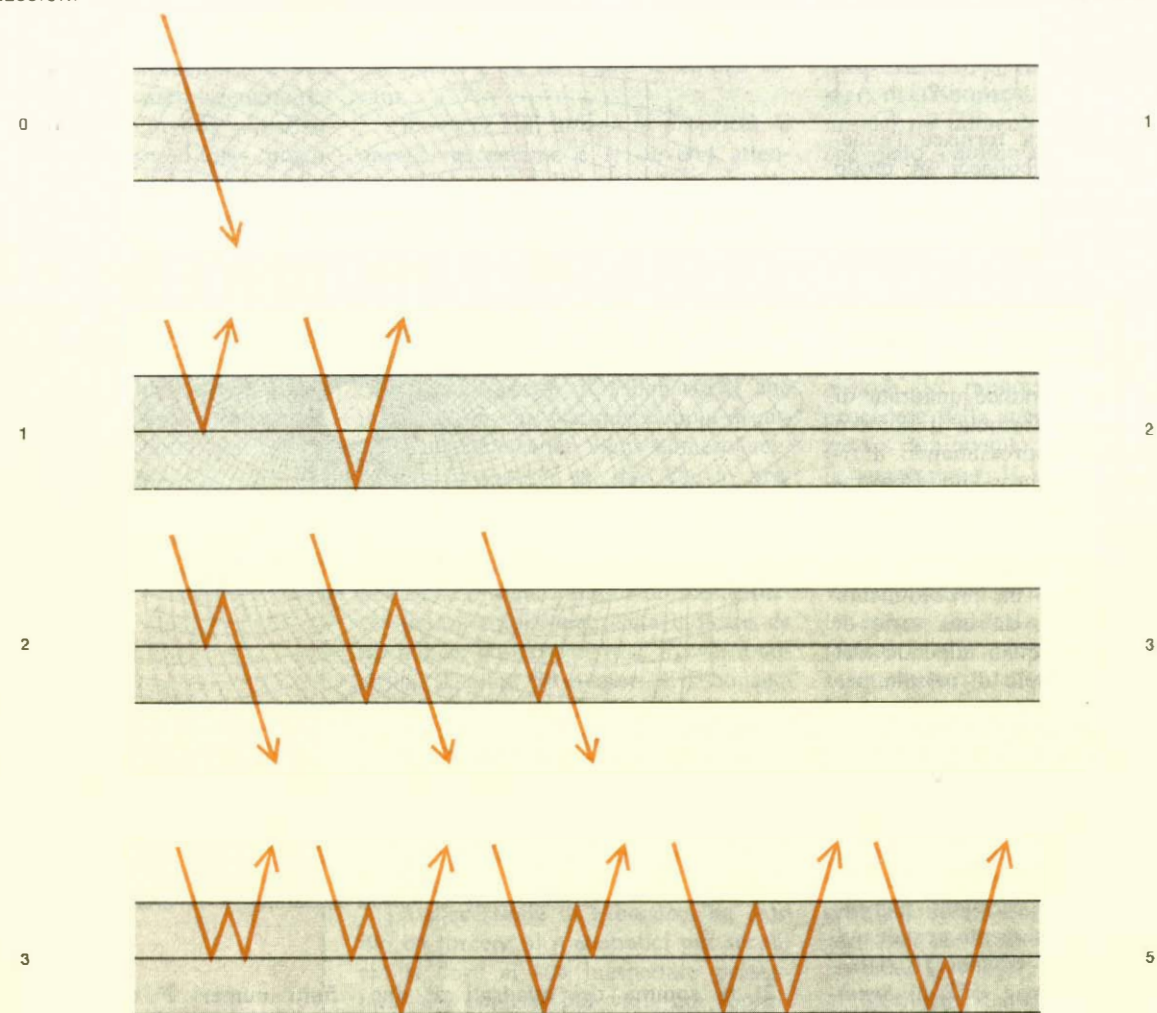
2) la somma dei quadrati di due numeri *F* successivi: F^2_n e F^2_{n+1} è F^2_{2n+1}. Poiché l'indice di F_{2n+1} è dispari, ne segue che, scritta la successione dei quadrati dei numeri di Fibonacci, le somme delle coppie di quadrati successivi forniscono la successione dei numeri *F* di indice dispari.

3) Se *A*, *B*, *C*, *D* sono quattro numeri di Fibonacci consecutivi, allora vale la formula: $C^2 - B^2 = A \times D$.

4) La successione delle cifre finali dei numeri della successione di Fibonacci si ripete in cicli di 60. Le ultime due cifre si ripetono in cicli di 300. Il ciclo è invece di 1500 per le tre cifre finali, 15 000 per quattro, 150 000 per 5 e cosí via.

5) Per qualsiasi intero *m* esistono infiniti numeri *F* divisibili esattamente per *m* e uno almeno di questi cade entro i primi m^2 numeri della successione di Fibonacci.

6) Ciascun terzo numero *F* è divisibile per 2, ciascun quarto per 3, ciascun quinto per 5, ciascun sesto per 8 e cosí via, e i divisori costituiscono di nuovo la successione di Fibonacci. Due numeri di Fibonacci (o di Lucas) consecutivi hanno come unico divisore comune 1.

7) Con l'eccezione del 3, l'indice di ogni numero *F* primo è pure primo (per esempio 233 è primo e il suo indice, 13, è anch'esso primo). Ciò si può anche esprimere dicendo che, se l'indice è composto (non primo), tale è anche il numero. Sfortunatamente non

L'ape può raggiungere la cella n seguendo F_{n+2} percorsi diversi.

Un raggio riflesso n volte può attraversare due lastre di vetro seguendo F_{n+2} percorsi diversi.

sempre vale l'inverso: un indice primo non significa necessariamente che il numero sia primo. Il primo esempio in contrario è $F_{19} = 4181$. L'indice è primo ma 4181 è uguale a 37 per 113.

Se il teorema inverso valesse in tutti casi, si avrebbe la soluzione del più importante problema non ancora risolto sui numeri di Fibonacci, ossia: esiste un'infinità di numeri di Fibonacci primi? Sappiamo che esistono infiniti numeri primi e quindi, se tutti i numeri F a indice primo fossero primi, ci sarebbero anche infiniti numeri F primi. Per ora non si sa se esista un massimo numero di Fibonacci primo.

8) Con la banale eccezione di 0 e 1 (definendo F_0 come 0) il solo numero F che sia un quadrato è F_{12}, 144, il quale, curiosamente, è il quadrato del proprio indice. La questione se vi fosse o no un quadrato maggiore di 144 tra i numeri della successione fu decisa solo nel 1963 da John H. E. Cohn del Bedford College dell'Università di Londra. Egli dimostrò anche che i soli quadrati nella successione di Lucas sono 1 e 4.

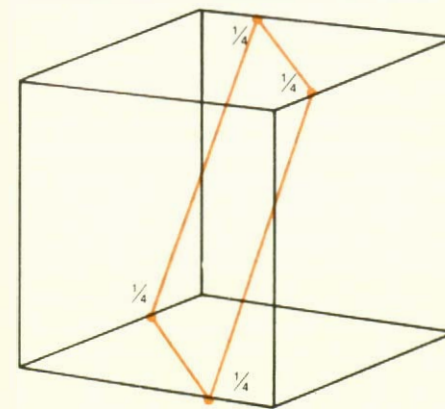
9) Sommando la successione di Fibonacci, a partire dallo zero, nel modo seguente:

```
0,0112358
      13
       21
        34
         55
          89
          144
           233
           . . .
            . . .
______________________
0,011235955040673 . . . = 1/89
```

si genera il reciproco di 89 che è l'undicesimo numero della successione stessa.

L'elenco delle proprietà della successione di Fibonacci potrebbe riempire un libro e lo stesso si può dire dell'elenco dei casi in cui la successione si presenta in fisica e in matematica.

Nel 1963 Leo Moser studiò i percorsi di una raggio di luce che si riflette tra due lastre di vetro affiancate faccia a faccia. Un raggio non riflesso attraversa le lastre in un unico modo *(si veda la figura in alto)*. Se un raggio è riflesso una volta si hanno invece due percorsi, tre percorsi se le riflessioni sono due, cinque percorsi se sono tre, ecc. Al crescere del numero di riflessioni, i numeri dei possibili percorsi cadono nella successione di Fibonacci, e infatti, per n riflessioni, i percorsi sono F_{n+2}.

La successione di Fibonacci si applica in modo molto simile al calcolo del numero di percorsi che possono essere scelti da un'ape per spostarsi attraverso un'arnia di celle esagonali *(si veda la figura a pag. 101)*. Le celle si estendono indefinitamente verso destra e supponiamo che l'ape si muova sempre verso una cella adiacente, e sempre verso destra. Non è difficile provare che c'è un solo percorso per raggiungere la cella 0, che ce ne sono due per la cella 1, tre per la 2, cinque per la 3 e così via. Come prima, il numero di percorsi è F_{n+2} dove n è il numero delle celle considerate.

Il quadrato nel cubo.

Esaminiamo ora il « gioco di Fibonacci », un gioco di abilità inventato pochi anni or sono da Robert E. Gaskell. La partita comincia con una pila di n contrassegni; si gioca togliendo di volta in volta qualche contrassegno. Chi gioca per primo non può prendere l'intero mucchio di contrassegni, mentre, subito dopo la prima mossa, è lecito all'uno o all'altro dei giocatori prendere ciò che ne resta a condizione però di rispettare le seguenti regole: a ogni turno si deve prendere almeno un contrassegno, ma mai più del doppio di quanti ne ha presi il giocatore precedente. Per esempio, se un giocatore prende tre contrassegni, il giocatore successivo non può prenderne più di sei. Vince chi prende l'ultimo contrassegno.

Risulta che, se n è un numero di Fibonacci, il secondo giocatore ha sempre la possibilità di vincere; altrimenti, è il primo giocatore a poter vincere. Se si inizia il gioco con 20 contrassegni (20 non è un numero di Fibonacci) quanti contrassegni deve prendere il primo giocatore per essere sicuro di vincere? La risposta sarà data il mese prossimo, allorché esamineremo anche una semplice strategia di gioco basata sui numeri di Fibonacci.

Il secondo problema (anche in questo caso la risposta verrà data il mese prossimo) riguarda un trucco poco noto di calcolo « lampo ». Chiedete a qualcuno alle vostre spalle di scrivere due qualsiasi interi positivi uno sotto l'altro e poi di sommarli riscrivendo il risultato sotto il secondo. Chiedetegli ancora di sommare questi ultimi due numeri, ottenendo così un quarto numero e di procedere allo stesso modo fino a ottenere una colonna di dieci numeri. In altri termini, il vostro collaboratore scrive dieci numeri di una successione di Fibonacci generalizzata nella quale i primi due numeri sono scelti a caso. A questo punto vi voltate, tracciate una riga sotto l'ultimo numero e immediatamente scrivete la somma dei dieci numeri.

Il segreto consiste nel moltiplicare per undici il settimo numero, operazione che si può facilmente eseguire a mente. Poniamo che il settimo numero sia 928. L'ultima cifra è 8, questa è anche l'ultima cifra della somma che ora costruiamo e che ci darà il risultato della moltiplicazione.

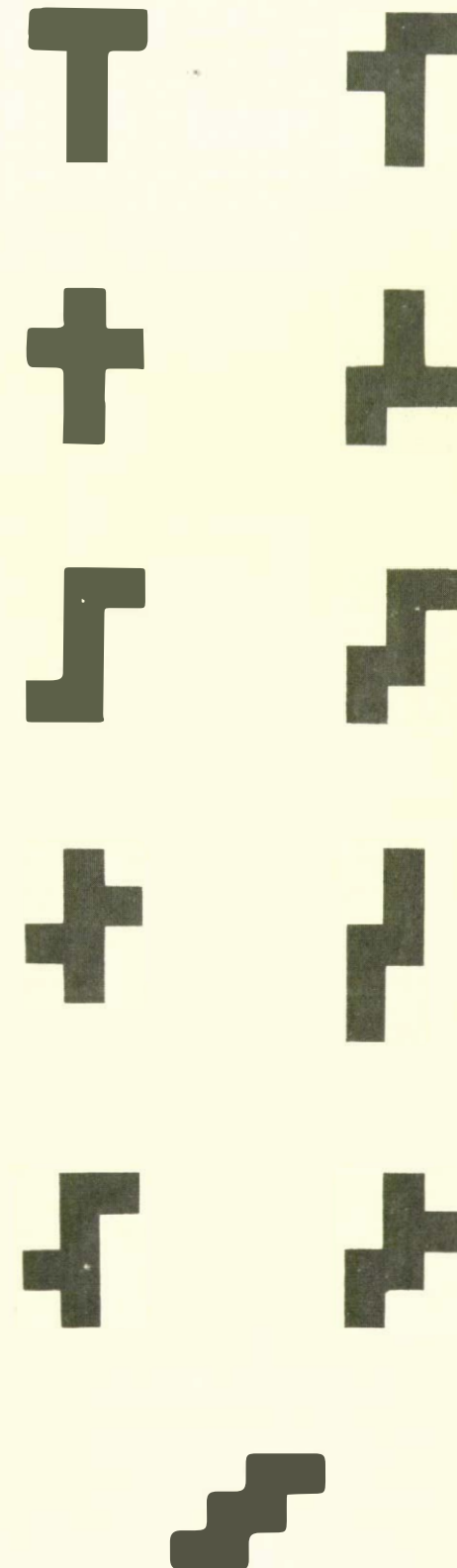
Sommiamo 8 con 2, ottenendo 10, poniamo 0 a sinistra di 8, riportando 1. La somma della successiva coppia di cifre, 9 e 2, è 11 a cui si aggiunge l'1 riportato prima, ottenendo 12. Poniamo ora il 2 a sinistra di 0 nella somma, riportando di nuovo 1. Aggiungiamo questo 1 a 9 e poniamo 10 a sinistra del 2 nella somma. La somma completa è ora 10 208. In breve, si sommano le cifre a coppie, andando verso sinistra, riportando 1 quando necessario e terminando con l'ultima cifra a sinistra.

Il lettore sa dimostrare, prima che la soluzione sia data il mese prossimo, che la somma dei primi dieci numeri di una successione generalizzata di Fibonacci è sempre undici volte il settimo numero della successione?

Ecco le soluzioni ai problemi del mese scorso:

Un tesseratto di lato x ha ipervolume x^4. Il volume della sua ipersuperficie è $8x^3$. Uguagliando questi due valori, si ottiene per x il valore 8. In generale, un ipercubo dello spazio a n dimensioni ha l'ipervolume di ordine n uguale all'ipervolume di ordine $(n - 1)$ della sua superficie quando il suo « iperspigolo » è $2n$.

Il quadrato più grande che può venire introdotto in un cubo unitario è quello mostrato nell'illustrazione in alto. Ogni vertice del quadrato si trova a una distanza pari a 1/4 dal vertice del cubo; l'area del quadrato è 9/8, e il suo lato è $3\sqrt{2}/4$. Per chi conosce il vecchio problema di far passare il cubo più grande possibile attraverso un'apertura quadrata in un cubo più piccolo avrà capito che il quadrato precedente costituisce la sezione di tale apertura quadrata. In altre parole, un cubo di lato lievemente inferiore a $3\sqrt{2}/4$ può essere fatto passare attraverso un'apertura quadrata in un cubo unitario.

Le illustrazioni a destra mostrano gli 11 differenti esomini che possono venire ripiegati a formare un cubo. Essi costituiscono un ingannevole insieme dei 35 distinti esomini, in quanto non potrebbero venire accostati l'uno all'altro in modo da formare un rettangolo contenente 66 quadrati unitari, ma forse esistono figure più interessanti che essi *potrebbero* formare.

Gli 11 esomini che formano un cubo.